

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA



جامعة باجي مختار - بآءء

Année : 2019

Faculté: **Sciences de l'ingéniorat**

Département: **Électrotechnique**

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : **MASTER**

Intitulé

ETUDE DE LA COMMANDE DE LA PUISSANCE ET
STOCKAGE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

DOMAINE : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par :

Lakhdara Amira

Devant le Jury

- | | | |
|--------------|---------------|----------|
| - Président | Chine A/Ghani | MAA UBMA |
| - Rapporteur | Mohammedi M | MCB UBMA |
| - Examineur | Soltani Fatma | MCA UBMA |
| | Merabet Leila | MCB UBMA |

Remerciements

C'est avec un grand soulagement et une fierté que j'achève ce modeste travail réalisé avec beaucoup d'espoir de réussite.

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu.

Je remercie chaleureusement mon encadreur le Dr Mohammedi Moufid pour avoir assuré de manière agréable le suivi de mon travail et pour m'avoir fait profiter de son expérience.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Mr Bahi Tahar pour toute sa gentillesse et ces petits soins face à ma curiosité, ses encouragements, sa disponibilité et ses conseils avisés qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Les honorables membres de jury trouveront en moi toute la fierté que je ressens, pour l'honneur et le temps qu'ils consacreront à me juger et le cas échéant à m'apprécier.

Le grand mérite revient aussi à mes chers parents, mes beaux parents et à mon mari qui m'ont soutenu jusqu'au bout.

Le mot de la fin revient à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je tiens à remercier avant tout le bon dieu de m'avoir permis d'honorer le souhait de mes parents, mon mari et mes enfants de me voire réussir.

Je saisis cette occasion mémorable dans le cours de ma vie pour dédier ce modeste travail :

A mes chers parents

A mon cher mari Mohamed

A mes chers enfants Anas et Inès

A mes chers frères

A ma famille et ma belle famille

A mes collègues de promo 2019 (électrotechnique)

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études concerne l'étude et l'analyse de fonctionnement d'une chaîne de conversion photovoltaïque connectée à un réseau électrique de distribution et aussi à un système de stockage. Le système est constitué, essentiellement, d'une chaîne photovoltaïque, un réseau électrique, une batterie de stockage et une charge triphasée à courant alternatif. La batterie et le réseau sont destinés à couvrir le manque de puissance demandée par la charge. Pour tester le fonctionnement, sous différentes conditions météorologiques notamment la variation de la température et d'irradiation, une étude par simulation a été effectuée et les résultats sont analysés et commentés.

Mots clés : Energies renouvelables, énergie solaire, stockage, gestion de puissance, commande, simulation,

Abstract

The work presented in this final dissertation concerns the study and analysis of the operation of a photovoltaic conversion chain connected to a distribution grid and also to a storage system. The system consists essentially of a photovoltaic chain, an electrical network, a storage battery and a three-phase AC load. The battery and the network are intended to cover the lack of power demanded by the load. To test the operation, under different meteorological conditions including temperature variation and irradiation, a simulation study was performed and the results are analyzed and commented.

Keywords: Renewable energies, solar energy, storage, power management, control, simulation,

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة النهائية بدراسة وتحليل تشغيل سلسلة تحويل كهروضوئية متصلة بشبكة توزيع وأيضاً بنظام تخزين. يتكون النظام بشكل أساسي من سلسلة الضوئية، وشبكة كهربائية، وبطارية تخزين وتحميل AC ثلاثي الطور. تهدف البطارية والشبكة إلى تغطية نقص الطاقة التي يتطلبها الحمل. لاختبار العملية، في ظل ظروف الأرصاد الجوية المختلفة بما في ذلك التغير في درجة الحرارة والإشعاع، تم إجراء دراسة محاكاة وتحليل النتائج والتعليق عليها. الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، الطاقة الشمسية، التخزين، إدارة الطاقة، التحكم، المحاكاة،

Table des figures

Figure 1.1	<i>Consommation de l'énergie primaire</i>	7
Figure 1.2	<i>évolution de la production mondiale d'électricité</i>	7
Figure 1.3	<i>Prévisions des besoins en énergies renouvelables jusqu'au 2150</i>	8
Figure 1.4	<i>Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM</i>	10
Figure 1.5	<i>Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. (Source : NREL solar spectrum)</i>	10
Figure 1.6	<i>Structure d'une cellule photovoltaïque</i>	12
Figure 1.7	<i>Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque</i>	14
Figure 2.1	<i>Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque</i>	15
Figure 2.2	<i>Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque</i>	16
Figure 2.3	<i>Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque</i>	17
Figure 2.4	<i>Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$</i>	19
Figure 2.5	<i>Caractéristique résultante d'une connexion de n_s cellules en série</i>	20
Figure 2.6	<i>Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle</i>	21
Figure 2.7	<i>Zoom de la caractéristique $I=f(v)$ variation de E</i>	22
Figure 2.8	<i>Caractéristique $P=f(v)$ variation de E</i>	22
Figure 2.9	<i>Zoom de la caractéristique $I=f(v)$ variation de T</i>	23
Figure 2.10	<i>Caractéristique $P=f(v)$ variation de T</i>	23
Figure 2.11	<i>Zoom de la caractéristique $I=f(v)$ variation de T et E</i>	24
Figure 2.12	<i>Caractéristique $P=f(v)$ variation de T et E</i>	24
Figure 2.13	<i>Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation</i>	26
Figure 2.14	<i>Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur</i>	28
Figure 2.15	<i>Symbole de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé</i>	29
Figure 2.16	<i>Classification des onduleurs PV connectés au réseau</i>	29
Figure 2.17	<i>Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux</i>	30
Figure 2.18	<i>Commande des semi conducteurs par hystérésis</i>	32
Figure 2.19	<i>Stratégie de commande des semi conducteurs par MLI</i>	32
Figure 2.20	<i>Schéma de principe du filtre RL</i>	34
Figure 2.21	<i>Schéma de principe d'une PLL</i>	35
Figure 3.1	<i>Schéma de principe d'un convertisseur Boost</i>	36
Figure 3.2	<i>Schémas équivalents du hacheur survolteur: K (a) : fermé, (b) : ouvert</i>	37
Figure 3.3	<i>Tension d'entrée (V_i) et tension de sortie (V_0) d'un hacheur Boost</i>	38
Figure 3.4	<i>Commande PWM avec $D=0.25$</i>	39
Figure 3.5	<i>Commande PWM avec $D=0.5$</i>	39
Figure 3.5	<i>Commande PWM avec $D=0.75$</i>	39
Figure 3.7	<i>Structure de commande du MPPT</i>	40
Figure 3.8	<i>Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque</i>	41
Figure 3.9	<i>Algorithme de la méthode P&O</i>	41
Figure 3.10	<i>Variation de l'irradiation E et la température constante $T=25^\circ\text{C}$</i>	42
Figure 3.11	<i>MPP avec variation de E et $T=25^\circ\text{C}$</i>	42

Table des figures

Figure 3.12	<i>Variation de la température et l'irradiation constante $E = 1000\text{W/m}^2$</i>	43
Figure 3.13	<i>MPP avec variation de T et $E = 1000\text{W/m}^2$</i>	43
Figure 4.1	<i>Structure de la chaîne de conversion</i>	44
Figure 4.2	<i>Conditions météorologiques (E variable et T constante)</i>	45
Figure 4.3	<i>Puissance active P et réactive Q de la charge</i>	45
Figure 4.4	<i>L'échange de puissance entre le panneau et le réseau</i>	46
Figure 4.5	<i>Modèle R-C de la batterie</i>	45
Figure 4.6	<i>Organigramme du fonctionnement de la batterie (charge/décharge)</i>	49
Figure 4.7	<i>Schéma du montage du convertisseur Buck-Boost</i>	50
Figure 4.8	<i>Schéma du régulateur PI</i>	50
Figure 4.9	<i>Schéma de la commande du convertisseur Buck-Boost</i>	51
Figure 4.10	<i>Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=300\text{V}$</i>	52
Figure 4.11	<i>Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=600\text{V}$</i>	53
Figure 4.12	<i>Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1000\text{V}$</i>	54
Figure 4.13	<i>Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1200\text{V}$</i>	55
Figure 4.14	<i>Schéma de la chaîne de conversion avec batterie de stockage</i>	56
Figure 4.15	<i>Conditions météorologiques (E variable et T constante)</i>	56
Figure 4.16	<i>Echange de puissance entre le panneau et la batterie</i>	57
Figure 4.17	<i>SOC et le courant de la batterie pendant la charge et décharge</i>	58

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Performances des différentes filières silicium	13
Tableau 2.1	Comparaison des principaux convertisseurs DC/DC	27

Nomenclature

GPV	Générateur photovoltaïque
PV	Cellule photovoltaïque
PPM	Maximum power point
MPPT	Maximum power point tracking
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
P&O	Perturb and observe
E	Ensoleillement, Irradiation
T	Temperature
V_{pv}	Tension du panneau
I_{pv}	Courant du panneau
V_{oc}	tension de circuit ouvert
I_{cc}	courant de court circuit
V_{OPT}	Tension optimale
I_{OPT}	Courant optimal
R_s	résistance série
R_p	résistance parallèle
R_{ch}	résistance de charge
V_{Max}	tension maximale
I_{Max}	intensité maximale
n_s	Nombre de cellules en série
n_p	Nombre de cellules en parallèle
K	semi conducteur
T_f	périodes de fermeture du semi conducteur
T_o	périodes d'ouverture du semi conducteur
T_c	période de cycle de commande
D	rapport cyclique
PLL	Phase Locked Loop
MLI	Commande par modulation de largeur d'impulsions
PWM	<i>MLI en anglais : Pulse With Modulation</i>
$i_{ar}, i_{br}, i_{cr},$	Courant du réseau
$V_{ar}, V_{br}, V_{cr},$	Tension du réseau
V_i	Tension d'entrée du hacheur
V_0	Tension de sortie du hacheur
P_r	Puissance active du réseau
P_{ch}	Puissance active de la charge
Q	Puissance réactive de la charge
SOC	state-of-charge
V_{bat}	Tension de la batterie
I_{bat}	Courant de la batterie
P_{bat}	Puissance de la batterie

SOMMAIRE

Introduction générale			1
CHAPITRE 1			
NOTIONS SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES			
1.1	Introduction		03
1.2	Types et définitions des sources des énergies renouvelables		03
	1.2.1	Types des sources d'énergies renouvelables	04
	1.2.2	Intérêt du PV, avantages et inconvénients	05
	1.2.2.1	Intérêt des systèmes photovoltaïques	05
	1.2.2.2	Avantages	05
	1.2.2.3	Inconvénients	06
1.3	Énergie dans le monde et problématique		06
1.4	Production d'électricité en Algérie		08
1.5	Principe de la conversion photovoltaïque		09
1.6	Cellule et générateur photovoltaïques		12
1.7	Conclusion		14
CHAPITRE 2			
MODELISATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAÏQUE			
2.1	Introduction		15
2.2	Modélisation de la cellule photovoltaïque		15
2.3	modèle électrique équivalent		16
	2.3.1	Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)	20
	2.3.2	Simulations et interprétation des caractéristiques	21
	2.3.2.1	$I=f(V)$, PV sous des différentes conditions météorologique	21
	2.3.2.2	Interprétation des résultats	25
2.4	Convertisseurs statiques		25
	2.4.1	Introduction	25
	2.4.2	Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)	26
	2.4.2.1	Hacheur	26
2.5	Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale		28
2.6	Onduleur pour PV		28
	2.6.1	Modélisation et structure d'un onduleur	30
2.7	Réseau, filtre et PLL		33
	2.7.1	Modélisation du réseau électrique	33
	2.7.2	Modélisation du filtre	33
	2.7.3	Circuit de synchronisation	35
2.8	Conclusion		35
CHAPITRE 3			
CONTROLE DE LA PUISSANCE MAXIMALE			
3.1	Introduction		36
3.2	Hacheur survolteur (Boost-converter)		36
3.3	Principe de la méthode		40
3.4	Techniques du suivi du point maximum de puissance		40
3.5	Conclusion		43

CHAPITRE 4		
CONTROLE DE PUISSANCES ET STOCKAGE		
4.1	Introduction	44
4.2	Connexion chaîne photovoltaïque réseau de distribution	44
	4.2.1 Simulation de la chaîne	45
4.3	Stockage	47
	4.3.1 Modélisation de la batterie	47
	4.3.2 Régulation de la charge/décharge	49
	4.3.3 Convertisseur Bidirectionnel Buck-Boost	49
	4.3.4 Dimensionnement du régulateur	50
4.4	Choix de la batterie	51
	4.4.1 Résultat de simulation	52
4.5	Chaîne de conversion avec batterie de stockage	56
	4.5.1 Simulation du fonctionnement	56
4.6	Conclusion	58
	Conclusion générale	59
	Références	60

INTRODUCTION GENERALE

Le besoin en énergie électrique n'a pas cessé de croître depuis plusieurs années consécutives exigeant en conséquence une consommation importante des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'uranium, etc Cependant, la consommation accrue de ce type de sources fossiles pour la production de l'électricité accentue l'émission de gaz à effet de serre et augmente la pollution. Alors, produire de l'électricité à base d'énergies renouvelables est une solution prometteuse pour produire proprement et palier au problème du réchauffement climatique de notre planète auxquels le monde est confronté.

On distingue plusieurs types de sources renouvelables notamment, éoliennes, hydrauliques, biomasses, géothermiques, solaires, ect. Les systèmes solaire sont des énergies à ressource illimitée (inépuisables à l'échelle humaine) dont le principale inconvénient est leur dépendance des conditions climatiques. Ils présentent des caractéristiques significatives par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables car le soleil est disponible et qu'en outre les technologies de leurs exploitations ainsi que leurs secteurs d'applications ont atteint un degré de maturité très avancé. Donc, grâce à cet intérêt et les objectifs attendus, le domaine des énergies renouvelables a suscité des recherches appliquées très approfondies favorisant ainsi un développement significatif de ce secteur. Les énergies renouvelables sont désormais de plus en plus compétitifs que les combustibles fossiles. L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables

Ainsi l'objectif de ce travail est l'étude d'un système de conversion photovoltaïque raccordé au réseau de distribution connecté avec un système de stockage.

Le contenu de ce mémoire est structuré en quatre (4) chapitres qui sont présentés comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente les notions fondamentales sur le domaine de la conversion d'énergie à base des énergies renouvelables (ER). Les types des ER sont définis et leurs principes d'exploitation présentés. Toutefois, une grande importance est réservée aux systèmes de conversion solaire domaine de cette étude.

Dans le deuxième chapitre, la modélisation des parties constituant de système de conversion étudié sont développés. Chaque élément de la chaîne est défini et son modèle mathématique développé. Cependant, les caractéristiques courant-tension et puissance –

tension des cellules photovoltaïques sont analysées sous différentes conditions de raccordement des cellules et variations de l'irradiation et de la température.

Le troisième chapitre est consacré exclusivement à l'étude de l'extraction de la puissance maximale que peut développer un panneau solaire quel que soient les conditions météorologiques. A cet effet, la méthode d'optimisation P&O : perturbation et Observation est développée et son algorithme présenté.

Le quatrième chapitre traite la gestion des puissances du système photovoltaïque, le réseau électrique et la batterie de stockage. Au début, le système de stockage n'étant pas branché on analyse l'écoulement de puissance entre le système PV, le réseau et une charge triphasée alternative. Dans ce cas, différents scénarios sont simulés et analysés pour valider le fonctionnement en basculement de la puissance. Par la suite, l'intérêt de stocker l'énergie produite en excès par le système photovoltaïque étant souligné, on présente d'abord une étude sur le choix de la batterie de stockage puis on analyse son effet (charge et décharge) dans l'ensemble du système.

Enfin, une conclusion générale qui résume l'essentiel des résultats obtenus de nos travaux est donnée.

CHAPITRE 1

NOTIONS SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

1.1 Introduction

Le besoin mondiale en énergie électrique pour le développement économique dans le monde, l'industrialisation et confort des personnes n'a pas cessé de croître durant le siècle précédent et a causé par conséquent une pollution aggravée de l'atmosphère [1]. Cette pollution est résultat de l'utilisation excessive des énergies fossiles pour la production de l'énergie électrique. Donc, il s'avère nécessaire que pour assurer la satisfaction de la demande en besoin énergétique de remplacer les énergies fossiles qui sont sensés être, inévitablement, épuisées dans un proche avenir par l'encouragement de l'utilisation des énergies renouvelables car elles sont économiques, durables et peu polluantes. Dans ce cas, les cellules photovoltaïques constituent les éléments de base de la technologie photovoltaïque. Elles convertissent le rayonnement solaire en courant électrique par effet photovoltaïque [1]. Sachant que la quantité de l'énergie solaire qui arrive sur la surface de terre après avoir traversé l'atmosphère est d'environ $1000\text{W}/\text{m}^2$ dans les zones tempérées et $1400\text{W}/\text{m}^2$ quand l'atmosphère est faiblement polluée.

La production d'électricité à partir de l'énergie solaire repose, essentiellement, sur deux technologies : la première concerne celle des panneaux photovoltaïques où les semi-conducteurs produisent un courant électrique sous l'effet de la lumière et la seconde concerne les centrales solaires thermiques, où des miroirs sont utilisées pour concentrer le rayonnement solaire sur un point focal afin d'avoir des températures très élevées (400 à 1000°C) pour produire l'électricité.

1.2 Types et définitions des sources des énergies renouvelables

Les sources des énergies fossiles sont celles qui sont issues de la fossilisation de matière organique dans le sous-sol terrestre alors que les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants, provoqués par les astres dont, principalement, le soleil [2]. Les gisements des énergies fossiles sont très localisés et souvent éloignés des lieux d'utilisation. Contrairement, les énergies renouvelables sont décentralisées et sont disponibles partout, sur toute la planète, bien que ce soit en quantités différentes. Cependant, la densité énergétique des énergies fossiles est très supérieure aux énergies renouvelables. En effet, sans utilisation de technologies pour concentrer les énergies renouvelables, elles ne peuvent produire de grandes puissances. Toutefois, les sources fossiles sont épuisables à l'échelle humaine, par contre les énergies renouvelables sont assez rapidement renouvelables pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine.

L'énergie solaire est captée par des cellules photovoltaïques, dont le rôle est de produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être connectées entre elles pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque.

1.2.1 Types des sources d'énergies renouvelables

Dans la nature, on relève plusieurs types de sources renouvelables notamment, éoliennes, hydrauliques, biomasses, géothermiques, solaires, ect... [2].

- **Energie éolienne** : pour cette énergie les phénomènes météorologiques se caractérisent par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère, que l'énergie éolienne transforme en énergie électrique.
- **Energie hydraulique** : les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) sont les origines, essentiellement, des phénomènes météorologiques. Principalement, l'évaporation de l'eau des océans cumule une énergie potentielle de pesanteur dès qu'elle soit en altitude. Par la suite, la valeur d'eau se transforme en pluie (eau) qui a son retour vers les océans peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectrique. D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

Energie des vagues : le mouvement des vagues peut être capté par des dispositifs tels le Pélamis (sorte de ver en métal articulé), le Searev ou encore le PH4S pour être transformée en électricité.

Energie marémotrice : cette énergie est produite grâce au mouvement de la quantité de l'eau créée par les marées (variation du niveau de la mer, courants de marée).

Energie hydrolienne : elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins.

Energie thermique des mers : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.

Energie osmotique : elle a pour origine la diffusion ionique due à la rencontre (mélange) de l'eau douce avec l'eau salée de la mer (phénomène d'osmose).

- **Energie biomasse** : il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse et exploitée par combustion ou métabolisation. Elle est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.
- **Energie géothermique** : le principe consiste à extraire l'énergie géométrique contenue dans le sol afin de l'utiliser pour chauffer ou la transformer en électricité.
- **Energie solaire** : le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau de l'irradiation (le flux énergétique) mesuré à la surface de la terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- *L'énergie solaire thermique*, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement ;
- *L'énergie photovoltaïque*, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.

- ✓ *Energie solaire thermique* : l'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :
Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique,

panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires). Et, indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou héliothermodynamique)).

- ✓ *Energie photovoltaïque* : l'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule).

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques [2] :

- ✓ *Les modules solaires monocristallins* ont le meilleur rendement au m² et sont, essentiellement, utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une central photovoltaïque ;
- ✓ *Les modules solaires poly-cristallins* représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline ;
- ✓ *Les modules solaires amorphes* sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

1.2.2 Intérêt du PV, avantages et inconvénients

1.2.2.1 Intérêt des systèmes photovoltaïques

La production de l'électricité à partir de l'énergie solaire nécessite l'utilisation de modules photovoltaïques [3, 4]. Lorsque les particules du rayonnement solaire atteignent la surface des cellules photovoltaïques, ils transmettent leur énergie aux électrons de la cellule provoquant leur mouvement et par conséquent la production d'un courant continu qui pourrait, éventuellement, être transformé en courant alternatif par un onduleur afin d'être injecté dans le réseau de distribution.

L'intérêt de l'utilisation des systèmes photovoltaïques réside, en premier lieu, comme tant une alternative pour produire, proprement de l'énergie électrique, en prévision de l'épuisement éminent des énergies fossiles. D'autres parts, l'encouragement de leurs utilisations contribuent, fortement, à la diminution u taus de rejets polluants dans l'atmosphère et à la préservation des ressources naturelles

1.2.2.2 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages [2] :

- haute fiabilité ;
- appropriés aux régions isolées et aux utilisations sur les engins spatiaux car ne comporte pas de pièces mobiles;
- Les panneaux photovoltaïques sont adaptables à des besoins énergétiques divers;
- Leurs coûts de fonctionnement très faibles ;
- Bonne qualités sur le plan écologique : utilisation sur les engins spatiaux non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. etc.....

1.2.2.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients [2], dont on note principalement:

- Produit des déchets du au démantèlement des installations de production en fin de vie.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement de conversion d'un module est faible de 28% pour les cellules au silicium cristallin;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Le cout coût du générateur photovoltaïque serait élevé si le stockage de l'énergie électrique dans des batteries est nécessaire ;
- La fiabilité et les performances dépendent du choix de la batterie et des composants de régulations qui lui sont associés.

1.3 Énergie dans le monde et problématique

La production de l'énergie électrique à base des ressources naturelles constitue une alternative à la protection de l'environnement, la sécurité d'approvisionnement et à l'indépendance énergétique.

En effet, malgré qu'alors les coûts de développement des technologies et des investissements dans les équipements de production pèsent sur le coût des énergies renouvelables, l'agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) estime qu'à l'avenir les énergies renouvelables seront les moins chères et aux prix stables grâce aux encouragements d'innovations technologiques régulières afin de produire de l'énergie à des conditions compétitives. Effectivement, selon IRENA le coût de l'électricité produite à base d'éolien baissera de 26% d'ici à 2025, puis encore de 40% d'ici à 2040 et de 58% d'ici à 2050. Et, celui à base du soleil, de 59% d'ici à 2025 [5]. Cependant, la capacité renouvelable installée dans le monde en 2016 a dépassé les nouvelles installations fossiles et nucléaires et le nombre de travailleurs qui travaillent dans le secteur des énergies renouvelables a atteint 9.8 millions de personnes. Les énergies renouvelables devront couvrir 58% des besoins en électricité et produisent plus de 4000GW d'ici à 2040 [6].

Le BP a publié dans [7] présente qu'au total, les énergies fossiles auraient compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017 le pétrole reste de loin la principale source d'énergie du mix énergétique mondial (34,2%), avec une hausse de la consommation de 1,7 million de barils par jour (Mb/j) en 2017.

La figure 1.1, montre l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire [7].

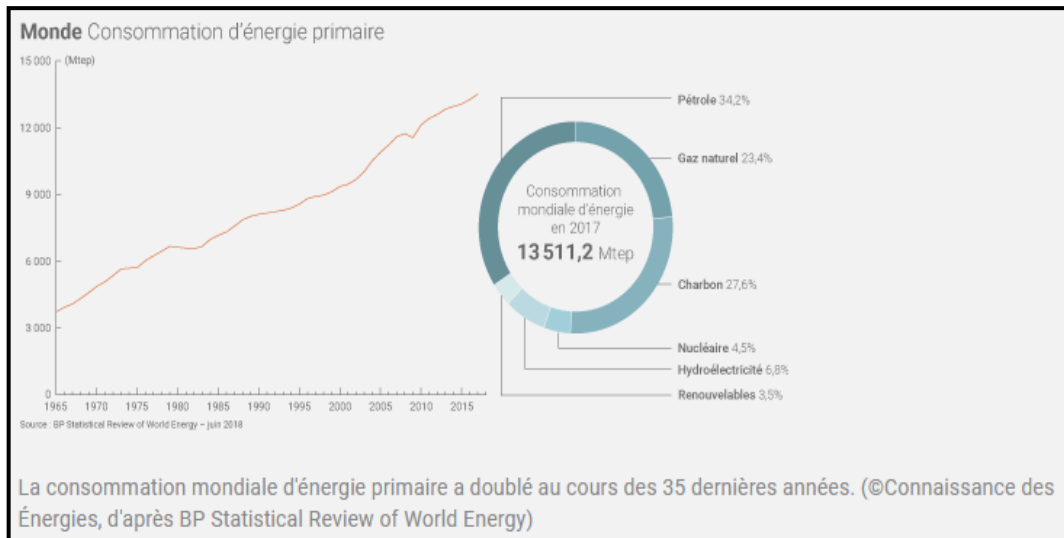


Figure 1.1 Consommation de l'énergie primaire

La progression des énergies renouvelables (25% de la production électrique mondiale en 2017). Pour rappel, le GIEC estime qu'il serait nécessaire, pour atteindre la cible de l'accord de Paris, de faire baisser de 40% à 70% l'ensemble des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050 (par rapport au niveau de 2010), avec une économie quasiment neutre en carbone durant la deuxième partie du 21^{ème} siècle.

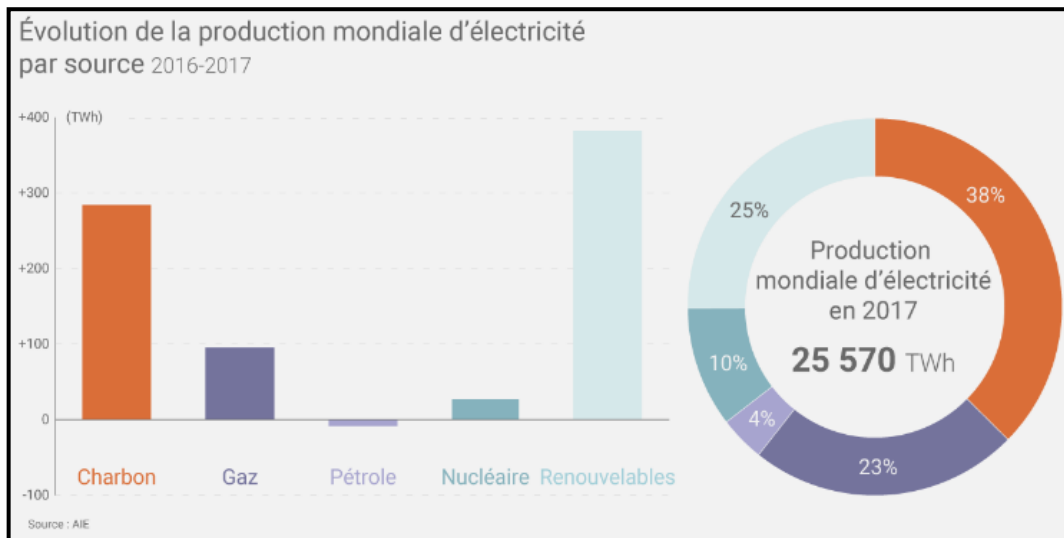


Figure 1.2 Evolution de la production mondiale d'électricité

Les sources fossiles sont menacées d'épuisement à court ou moyen terme. Les scénarios de production d'énergie de l'Association for Study of Peak Oil, [8] est illustré par la figure 1.3. Elle montre la production d'énergies fossiles prédite par habitant et par an et la consommation d'énergie totale en énergie fossiles et renouvelables. On remarque clairement que la courbe qui représente la production rapportée à la population mondiale, présente un maximum vers ou avant l'année 2020, puis décroît : la cause est que la production n'est plus capable de satisfaire la demande. Alors que la zone verte représente l'écart entre la consommation totale d'énergie et la production d'énergies fossiles, indique le besoin en énergies renouvelables.

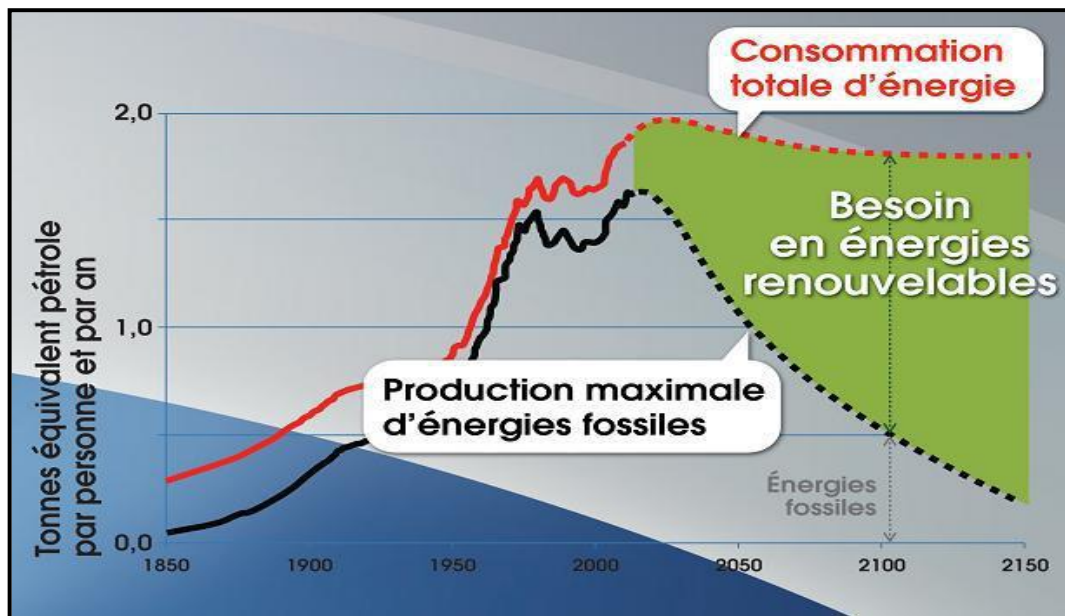


Figure 1.3 Prévisions des besoins en énergies renouvelables jusqu'au 2150 [8]

En conséquence, les besoins en énergie augmentent et les réserves d'énergies fossiles diminuent. Par conséquent, il est incontestablement le temps d'encourager la production d'énergie à base des ressources renouvelables afin de continuer à satisfaire les besoins mondiaux en énergie électrique. Le solaire photovoltaïque connecté au réseau représente l'essentiel de la production mondiale d'électricité solaire. Malgré la croissance du marché photovoltaïque dans le monde, la production électrique développée par les panneaux photovoltaïques reste encore très faible dans les mix électriques nationaux.

1.4 Production d'électricité en Algérie

La situation géographique de l'Algérie lui offre l'avantage de disposer d'un des gisements solaires des plus importants au monde avec un ensoleillement annuel de plus de 3 500 heures. Par ailleurs, le potentiel de l'Algérie en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, le gouvernement algérien considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. En effet, le programme en énergies renouvelable, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects. C'est pourquoi, le programme adopté par le gouvernement algérien, en 2011 et qui a été révisé en 2015, sur les énergies renouvelables, notamment les, photovoltaïques, l'éoliennes et etc. ... vise à produire 22000MW d'ici l'année 2030 [9], alors que, seulement 5% de la production totale d'électricité en Algérie provenait des sources renouvelables (hydraulique et solaire) et que le gaz naturel est la principale ressource énergétique. Cette ambition mène à ce que 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, soient d'origine renouvelable. A ce or, on compte l'installation de 23 centrales photovoltaïques et

une production de 500MW, seulement, au vu de l'objectif à atteindre. Ainsi, l'Algérie s'est vue engagée d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Les énergies renouvelables sont désormais de plus en plus compétitifs que les combustibles fossiles [10]. Cette dernière référence indique que l'Afrique du Sud (1.8 GW) et l'Algérie (environ 0,4 GW) sont les deux pays possédant le plus de capacités installées à la fin 2017.

1.5 Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par *Antoine Becquerel en 1839*, mais il a fallu attendre presque un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. Le mode d'utilisation d'un système solaire est basé sur les exigences techniques, économiques et géométriques. Alors, il y a, principalement, trois modes : Autonome, Hybride et raccordée au réseau.

+ Système autonome

Les systèmes autonomes sont installés pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Un tel mode d'utilisation nécessite, généralement, l'insertion d'un système de stockage associé aux générateurs photovoltaïques (PV) afin d'assurer l'alimentation, à chaque instant de la journée et la nuit et pendant plusieurs jours quelque soit les conditions météorologiques.

+ Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique, le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie [11].

+ Système PV raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des chaînes (strings en anglais) eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [12]. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge [13-15]. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour « Air Mass ». Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (Figure 1.4). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000 W/m² au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1).

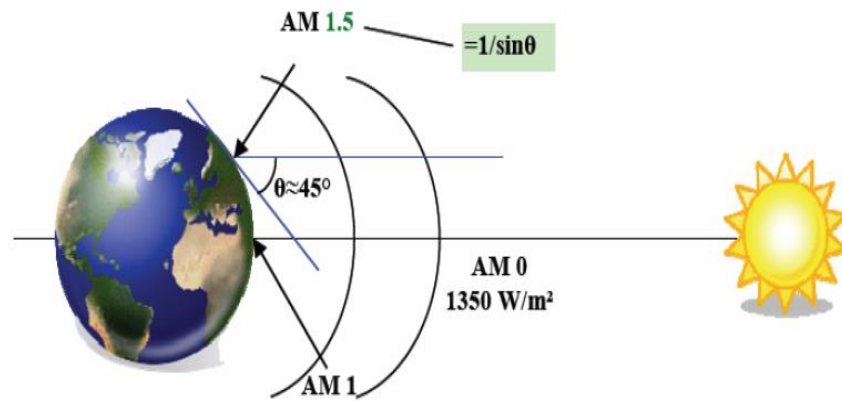


Figure 1.4 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [15]

La valeur du rayonnement global reçu au sol est déterminée en ajoutant à ce dernier le rayonnement diffus qui concerne le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 . La Figure 1.5 correspondant à latitudes indiquées [16-17].

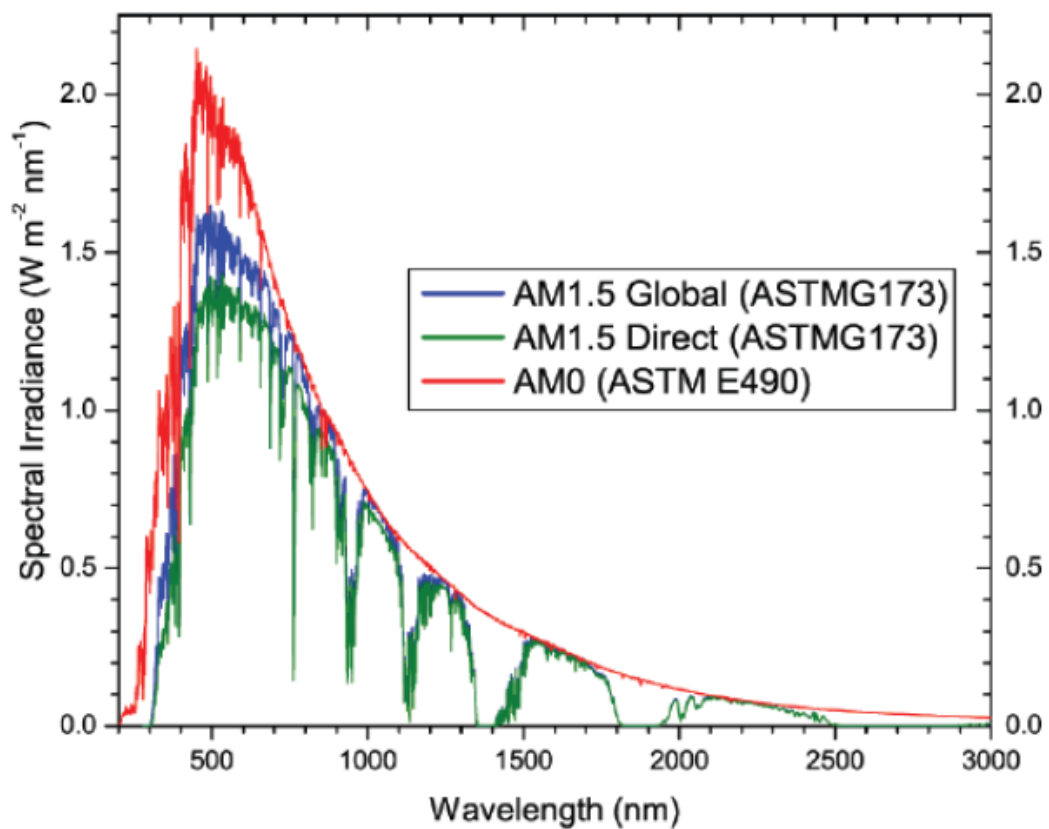


Figure 1.5 Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. (Source : NREL solar spectrum) [17].

L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Antoine Becquerel dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Plus généralement, on qualifie de photoélectriques tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur la matière qui provoquent une éjection d'électrons du matériau : l'émission photoélectrique, la photoconductivité et l'effet photovoltaïque.

À ce dernier est également associé, par le choix judicieux d'un matériau adapté, l'apparition de forces électromotrices, ce qui permet une conversion directe de l'énergie du rayonnement en énergie électrique. Du point de vue historique, ces différents effets sont découverts expérimentalement au cours du 19^{ème} siècle. Mais ce n'est qu'en 1905, qu'Albert Einstein lève les difficultés posées par l'interaction entre lumière et matière, en introduisant les quanta de lumière pour interpréter la loi du rayonnement proposée en 1900 par Max Planck. Albert Einstein produit une théorie qui explique les phénomènes photoélectriques en introduisant le concept de photons, à la fois particule et onde. Dans cette théorie, on démontre que l'énergie d'un photon est entièrement transférée à un électron du matériau et que le courant photoélectrique est proportionnel au nombre de photons, donc au flux lumineux.

Du point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photons de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

E (J) : énergie en Joule;

h (J.s) : constante de Planck ($h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$) ;

c (m.s⁻¹) : vitesse de la lumière ($c = 299\,792\,458 \text{ m} / \text{s}$) ;

λ (m) : longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre) ;

ν (Hz) : fréquence.

On obtient donc la relation suivante qui lie l'énergie du photon exprimée en électron-volt (eV) et sa longueur d'onde exprimée en μm par :

$$E_{\text{ev}} = 1.2419 / \lambda_{\mu\text{m}} \quad (1.2)$$

La conversion photovoltaïque est donc définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière [18].

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé : l'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h \nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur défini par l'équation (1.3), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction [2]

$$E_g = E_c + E_v \quad (1.3)$$

Donc, toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion

photovoltaïque. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm. L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante :

$$E = h * \frac{c}{\lambda} \quad (1.4)$$

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque. Il constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

1.6 Cellule et générateur photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque (PV) est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique [2]. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure 1.6 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

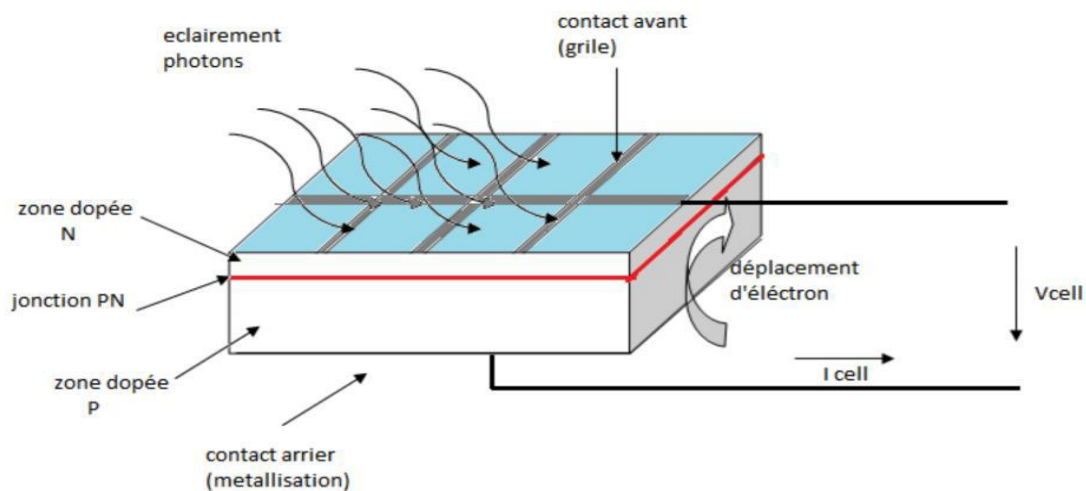


Figure 1.6 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [2].

Différents types de technologies de fabrication des cellules photovoltaïques existent sur le marché, en effet les cellules photovoltaïques basés sur le silicium cristallin dominent le marché avec plus de 90%. On distingue deux catégories des cellules fabriquées à partir du silicium cristallisé, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium poly-cristallin. Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium poly-cristallin mais de rendement plus élevé. Le silicium est aussi utilisé dans la technologie dite amorphe, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui sera projeté sur une feuille de verre. Ce type de cellules présente l'avantage d'être intégré sur des supports souples ou rigides, il est utilisé généralement pour les calculatrices et les montres. Le tableau 1.1 montre les performances des différentes filières silicium présentent actuellement sur le marché [16].

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
<i>Monocristallin</i>	12 à 16 %	-0.442% par °C	-0.38% par an
<i>Poly-cristallin</i>	11 à 14 %	-0.416% par °C	-0.35% par an
<i>Amorphe</i>	6 à 7 %	-0.175% par °C	-1.15% par an

Tableau 1.1. Performances des différentes filières silicium

Dans la suite, on cite quelques types de cellules photovoltaïques qu'on peut rencontrer, telles que [19, 20] :

- ❖ La cellule photovoltaïque multi-jonction : Ces cellules sont constituées de plusieurs couches minces associant de matériaux semi-conducteurs. Par exemple, Une cellule triple jonction est constituée des semi-conducteurs GaAs (arséniure de gallium), Ge (germanium) et GaInP2 (Phosphure d'indium gallium). Le rendement des cellules multi-jonction est très élevé, il dépasse parfois les 40%. Ces cellules ont été développées en priorité pour les applications spatiales à cause de son coût de fabrication très élevé.
- ❖ La cellule photovoltaïque CIGS : La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Ces nouvelles techniques de haute performance utilisent des métaux rares comme l'indium dont la production mondiale est faible, ce qui rend le coût de fabrication élevé.
- ❖ La cellule photovoltaïque organique : Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Le rendement de ces cellules est encore inférieur à 3% mais leur coût est faible à cause du faible prix de la matière première.

Lorsque les photons sont absorbés par la cellule, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des paires électrons-trous. Ceci crée alors une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) entre les deux couches que l'on peut mesurer entre les bornes positives et négatives de la cellule, nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, ce courant est nommé courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'éclairement (E). A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. La figure 1.7 illustre la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{OPT} et I_{OPT}) [19 , 20].

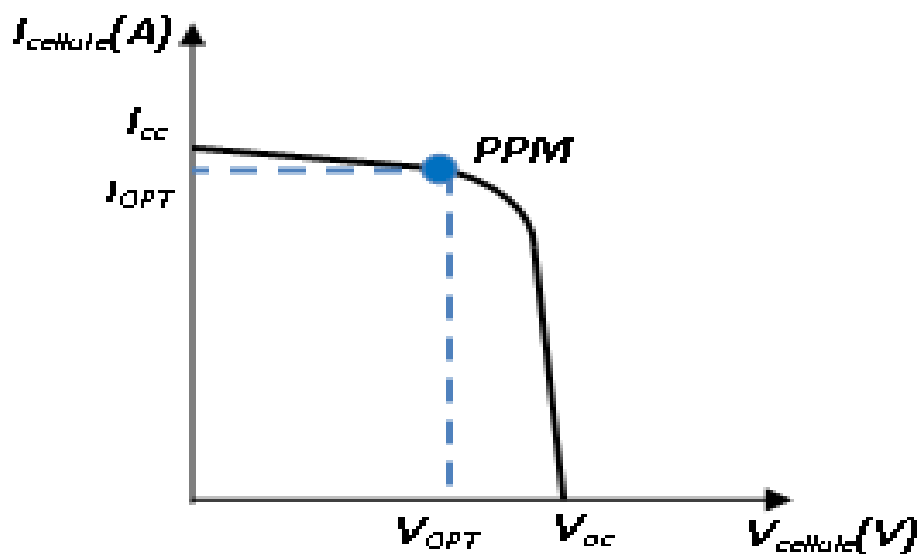


Figure 1.7 Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

1.7 Conclusion

Grace à leur avantages considérables la production de l'électricité à base des énergies renouvelables est une des préoccupations majeurs de part le monde. Cependant, dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, la suite de notre travail a consisté à la modélisation, la commande et la simulation d'une chaîne photovoltaïque raccordée à un réseau de distribution.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on traite le module et le développement mathématique des cellules photovoltaïques notamment le modèle à une seule diode.

Les modèles de circuits équivalents aux cellules photovoltaïques et leurs modèles mathématiques sont développés afin d'étudier le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs.

2.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Dans la littérature, deux (2) modèles : modèle à deux diodes et modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque sont traités [16,19-22]. Concernant, le circuit équivalent à deux (2) diodes d'une cellule solaire est réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes, une source de courant produisant le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule, une résistance série (R_s) et une résistance montée en parallèle (R_p), comme le montre la figure 2.1.

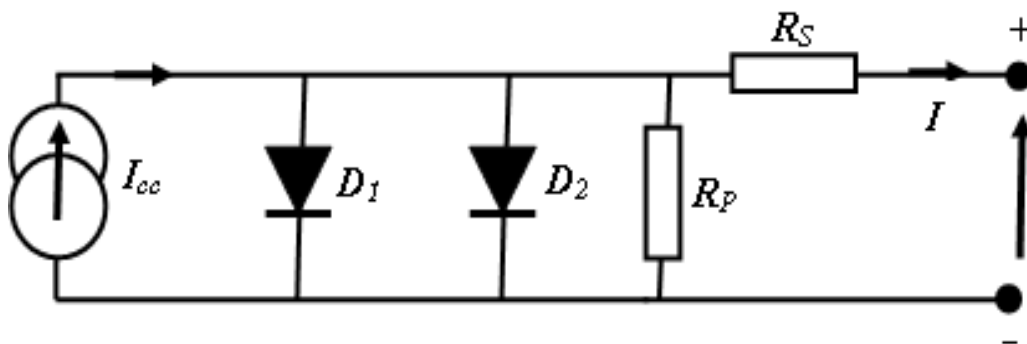


Figure 2.1 Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.

Or, la cellule photovoltaïque est aussi représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode en moins par rapport au modèle à deux diodes comme le montre la figure 2.2.

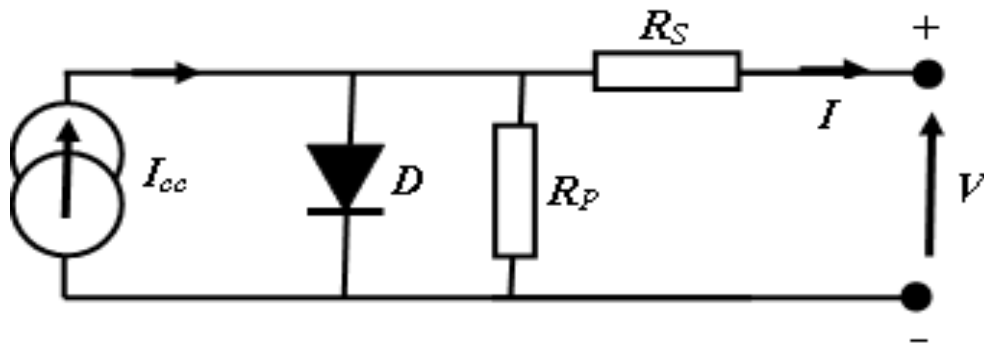


Figure 2.2 Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.

2.3 modèle électrique équivalent

Pour les modèles précédents, les expressions du courant I de sortie sont, respectivement, données par l'équation suivante [16 ,19-22].

$$I = I_{cc} - I_{01} \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Avec,

I_{cc} (A), le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température,

I_{01} (A) : courant de saturation de la diode1 ;

I_{02} (A) : courant de saturation de la diode2 ;

K : ($1.381 \cdot 10^{-23} J / K$), constante de Boltzmann ;

T_c (K) : température effective de la cellule ; $T(K)=273+T$ ($^{\circ}C$)

q : ($1.602 \times 10^{-19} C$), la charge de l'électron ;

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1 ;

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2 ;

I (A) : courant fourni par la cellule ;

V (V) : tension aux bornes de la cellule ;

R_p (Ω) : résistance parallèle ;

R_s (Ω) : résistance série.

Facteur d'idéalité

Le facteur d'idéalité n est compris entre 1 et 2 :

$$1 \leq n \leq 2 \quad (2.2)$$

Le facteur d'idéalité est égal à « 1 » pour une diode idéale, mais peut monter jusqu'à 2, lors de la prise en compte du courant de génération – recombinaison. L'expression de n est obtenue en dérivant le logarithme népérien de I par rapport à V .

$$n = \frac{1}{V_T} * \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (2.3)$$

On relèvera des écarts de tension et de courant dans la partie proche de V_{co} qui est une droite, après avoir converti l'échelle de courant en logarithme [23].

Dans la suite, de ce mémoire, on va considérer le modèle à une seule diode car c'est celui qui est le plus souvent utilisé.

On présente ci après plus de détails sur le développement mathématique du modèle du circuit équivalent à une seule diode.

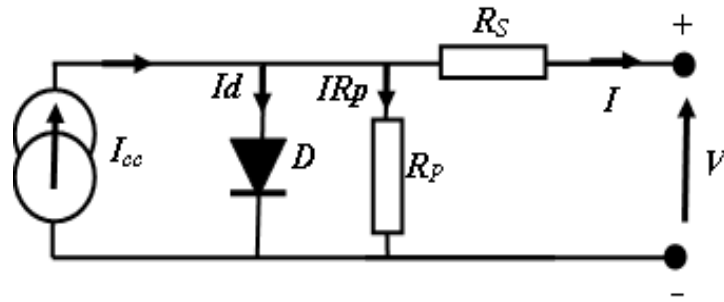


Figure 2.3 Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque

Où,

R_p (Ω): Résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction ;

R_s (Ω): Résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion.

De la figure 2.3, on peut déduire :

$$I = I_{cc} - I_d - I_{R_p} \quad (2.4)$$

I_{cc} (A): Courant de court-circuit (Photovoltaïque) qui dépend de l'ensoleillement et de la température ;

I_d (A): Courant à travers la diode ;

I_{R_p} (A): Courant à travers la résistance parallèle.

Le courant de court-circuit à une température (T) quelconque est exprimé par la relation suivante :

$$I_{cc(T)} = I_{cc(T_{ref})} [1 + k_i (T_c - T_{ref})] \quad (2.5)$$

$I_{cc(T_{ref})}$: Courant de court circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de $1000W/m^2$ et qui est donné par la fiche technique du constructeur ;

T_{ref} : Température de référence de la cellule exprimée en Kelvin ($^{\circ}K$) correspondante à la température standard $25^{\circ}C$, soit $T_{ref}(^{\circ}K)=25+273.15^{\circ}K$;

k_i : Coefficient de température de I_{ph} exprimé en ($\%/^{\circ}C$) (selon la fiche du constructeur) ;

Le courant I_{cc} est proportionnel à l'ensoleillement (E). On l'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc}(E) = I_{cc}(E_0) * \frac{E}{E_0} \quad (2.6)$$

Où,

E_0 est l'ensoleillement nominal standard égal à $1000W/m^2$.

L'expression (2.4) peut s'écrire :

$$I = I_{cc} - I_d - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (2.7)$$

Avec,

$$I_d = I_0 (e^{\frac{q}{nkT_c}(V+I*R_s)} - 1) \quad (2.8)$$

En considérant que la cellule photovoltaïque est de bonne qualité, la R_p aura une valeur très élevée et donc le troisième terme de la partie droite de l'équation (2.7) peut être négligé ($\frac{V + I * R_s}{R_p}$).

Ainsi, on retient de (2.8) que :

$$e^{\frac{q}{nkT_c}(V+I*R_s)} \gg 1 \quad (2.9)$$

Donc, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit :

$$I = I_{cc} - I_0 e^{\frac{q}{nkT_c}(V+I*R_s)} \quad (2.10)$$

Par ailleurs, des grandeurs caractéristiques en l'occurrence le courant de court circuit (I_{cc}) et la tension du circuit ouvert (V_{co}) peuvent être déterminés de la caractéristique $I=f(V)$.

La tension V_{co} (circuit ouvert) est donnée par le fabricant ou mesurée grâce à des relevés sous un éclairage $1000W/m^2$. La potentielle thermodynamique V_T est calculée à $300 K$.

Cependant, l'allure de la caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) d'une cellule PV pour une température et une irradiation fixes est illustrée par la figure 2.4.

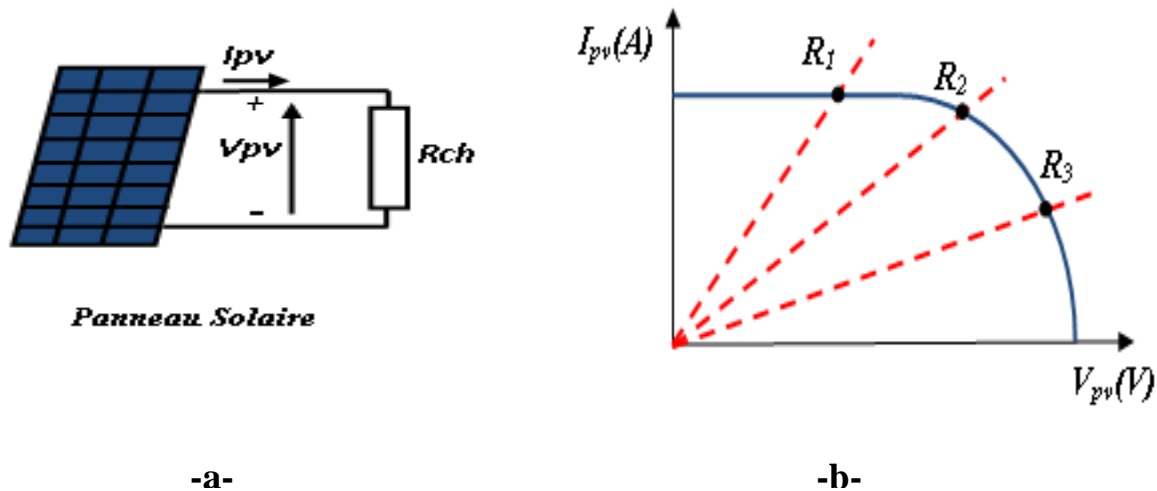


Figure 2.4 Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$

Pour une résistance de charge (R_{ch}) connectée aux bornes de la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des caractéristiques de la cellule et de la charge. Où, si la charge est purement résistive sa caractéristique est une droite $\frac{I}{V} = \frac{1}{R_{ch}}$ (cas de la figure 2.4.b).

Avec :

- **Courant de court-circuit (I_{cc}):** c'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où $V=0$ (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$;
- **Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :** c'est la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant de la cellule PV est nul. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT_c}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_{th} * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (2.11)$$

Où,

$$V_{th} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \text{ c'est la tension thermique.} \quad (2.12)$$

- **Puissance maximale :** elle est associée à une tension maximale (V_{Max}) à une intensité maximale (I_{Max}) et que sous les conditions normalisées d'ensoleillement (STC) standard (Température=25° et un Eclairage = 1000 w/m²), elle est dite puissance crête.
- **Facteur de forme(FF) :** c'est le rapport de la puissance maximale délivrée à la charge sur le produit (I_{cc} , V_{co}).

$$FF = \frac{P_{Max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (2.13)$$

Pour les cellules ayant un rendement moyen, le $FF = 0.7$ à 0.85 .

- **Rendement de la conversion** : c'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraire, à la puissance de rayonnement incident (P_{inc}) sur une surface de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{S * G_a} = \frac{V_{co} * I_{cc} * FF}{P_{inc}} \quad (2.14)$$

Avec (P_{inc}) est égale au produit de l'éclairement par la surface totale des photopiles.

Ce paramètre (η) reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, généralement, il est de $14 \div 16 \%$ [24].

2.3.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

La puissance maximale que peut délivrer par exemple une cellule en silicium de 150 cm^2 sous une tension de 0.5V sous des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C) est de 2.3W environ. Puisque, cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications en pratique, les cellules sont regroupées entre elles pour former un module et le regroupement de modules identiques constitue un panneau photovoltaïque. Enfin, le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série/parallèle de nombreux panneaux photovoltaïques. Lorsque les cellules (panneaux) identiques sont assemblées en série, les tensions s'additionnent si elles sont montées en parallèle, c'est les courants qui s'additionnent.

Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. La figure 2.5 montre la caractéristique résultante (I_{ccns}, V_{cons}), avec $I_{ccns} = I_{cc}$ et $V_{cons} = n_s * V_{co}$.

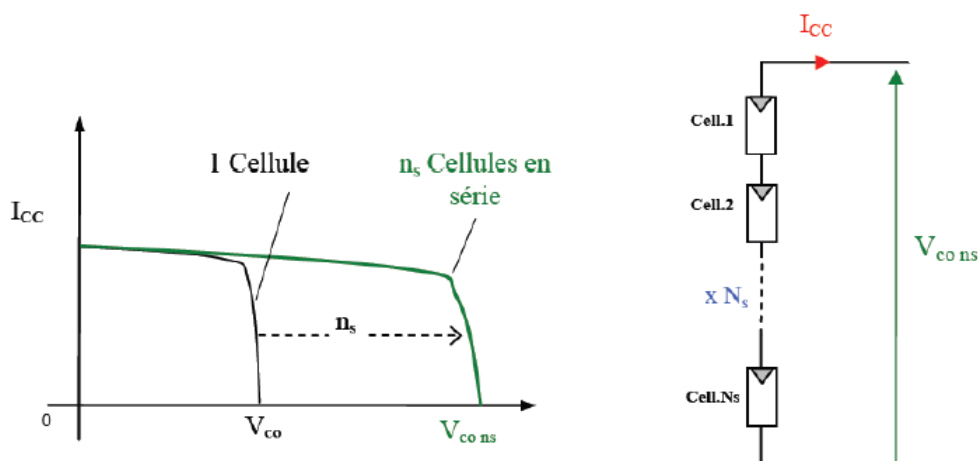


Figure 2.5 Caractéristique résultante d'une connexion de n_s cellules en série

Dans le cas d'un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La Figure 2.6 illustre la caractéristique résultante avec $I_{ccnp} = n_p * I_{cc}$ et $V_{conp} = V_{co}$ [16].

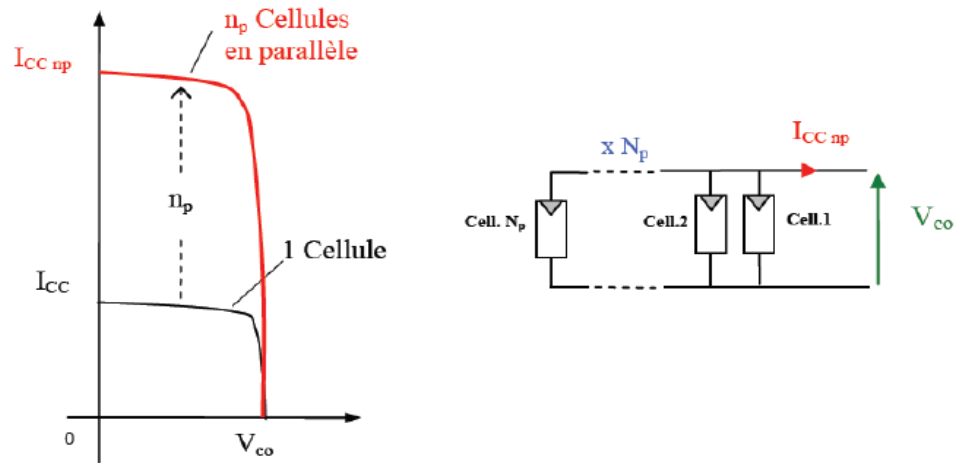


Figure 2.6 Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

2.3.2 Simulations et interprétation des caractéristiques

• 2.3.2.1 $I=f(V)$, PV sous des différentes conditions météorologique

Les caractéristiques courant et puissance en fonction de tensions, obtenues par simulations sous différentes conditions météorologiques (irradiation et température) sont présentées par les figures 2.7 à 2.12.

On remarque que les points caractéristiques (I_{cc} , V_{co} , P_{max}) de $I=f(V)$ varient en fonction de l'irradiation et de la température.

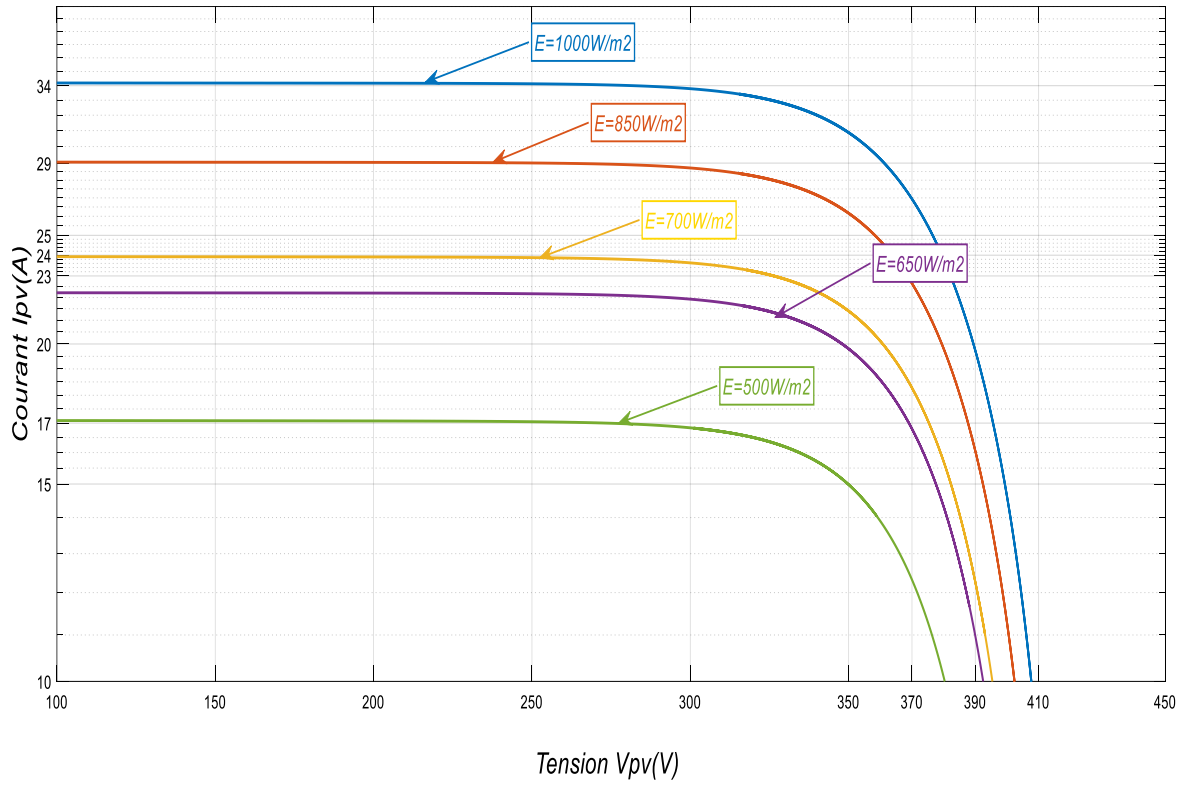


Figure 2.7 Zoom de la caractéristiques $I=f(v)$ variation de E

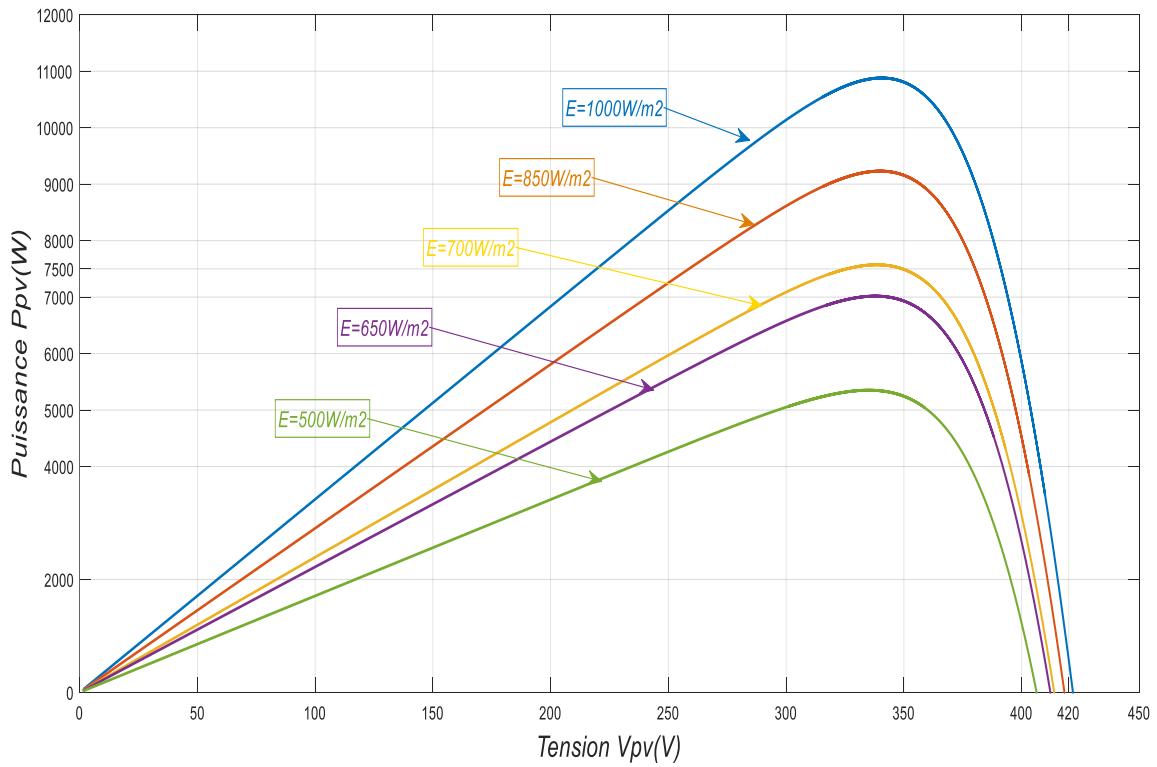


Figure 2.8 Caractéristiques $P=f(v)$ variation de E

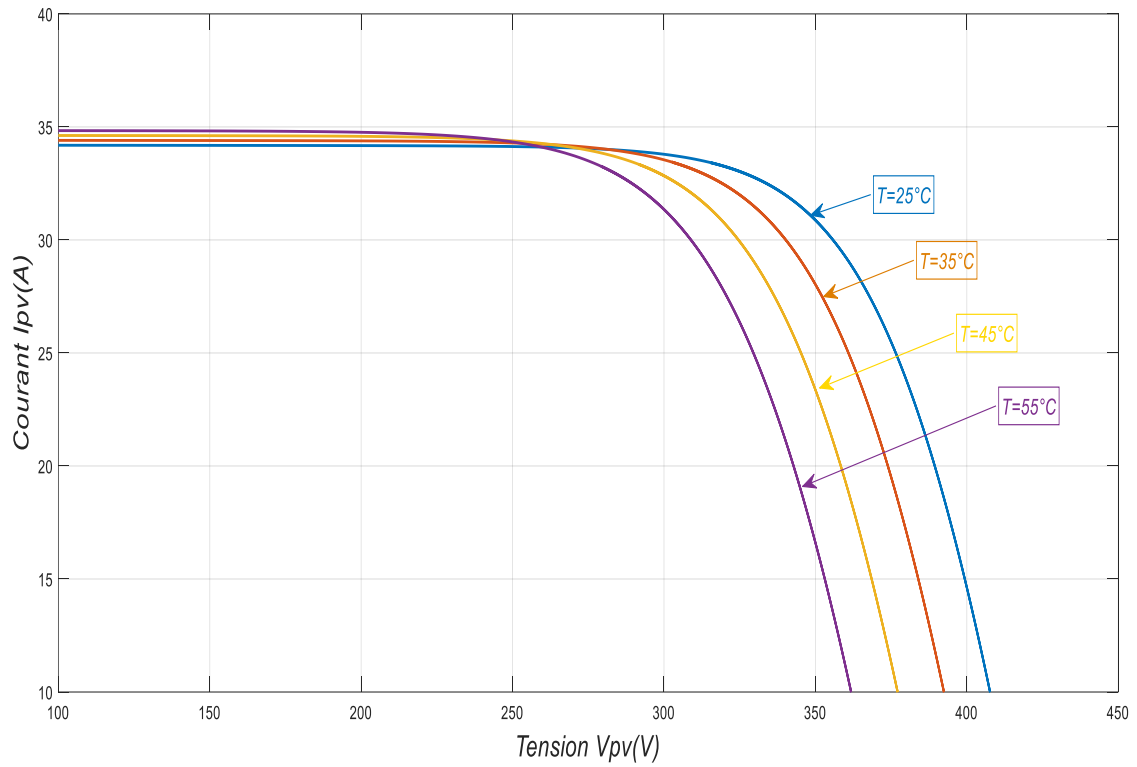


Figure 2.9 Zoom de la caractéristiques $I=f(v)$ variation de T

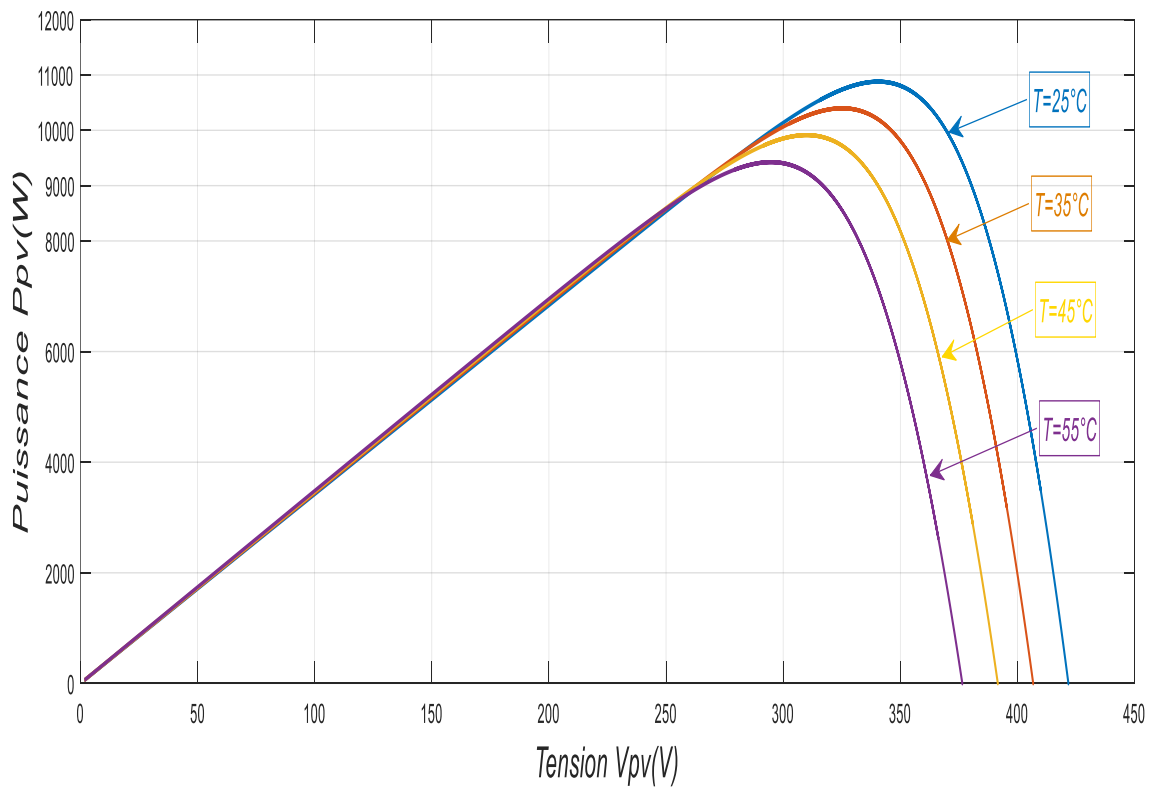


Figure 2.10 Caractéristiques $P=f(v)$ variation de T

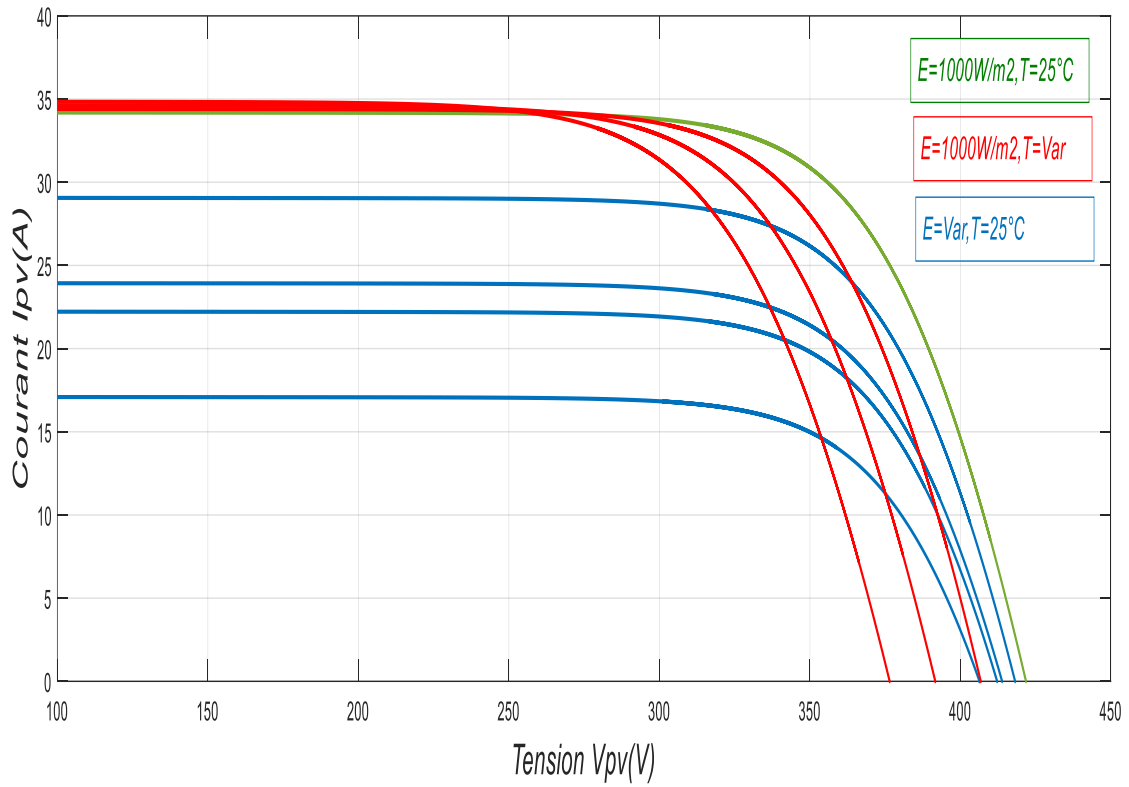


Figure 2.11 Zoom de la caractéristique $I=f(v)$ variation de T et E

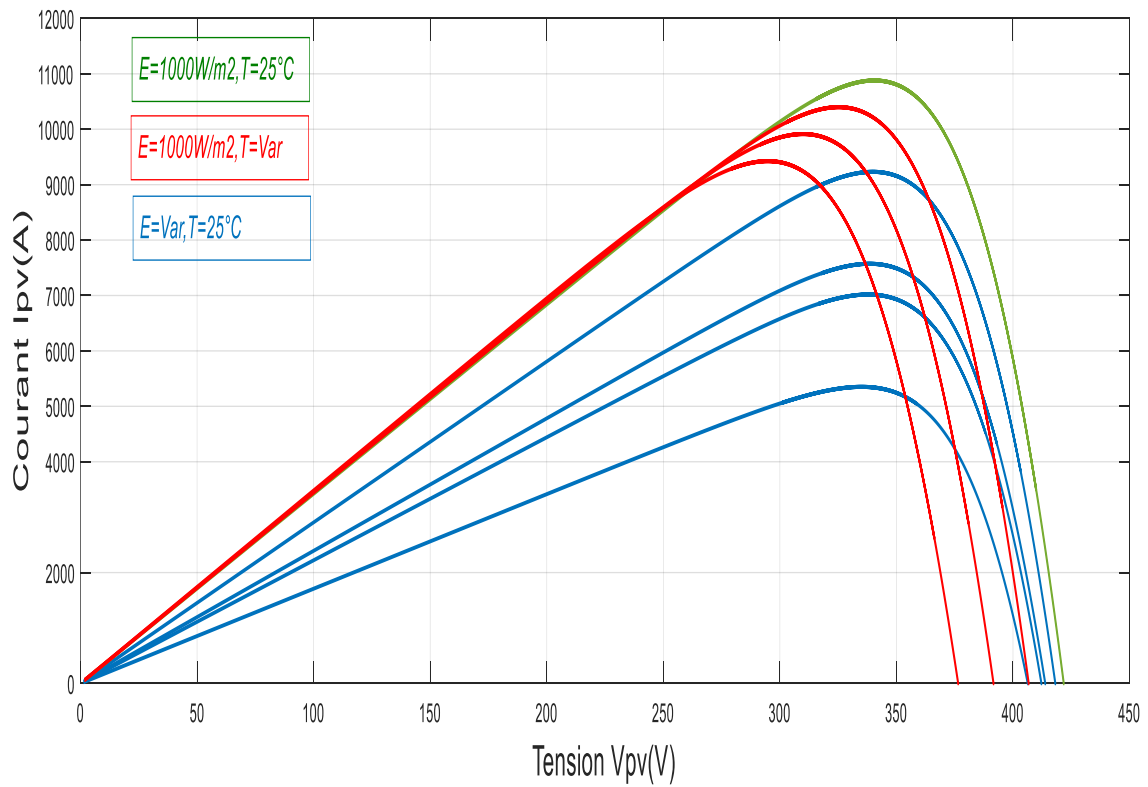


Figure 2.12 Caractéristique $P=f(v)$ variation de T et E

- **2.3.2.2 Interprétation des résultats**

Concernant les deux premières, notamment les figures 2.7 et 2.8, elles montrent, respectivement, l'évolution du courant et de la puissance lorsque la température est maintenue constante à sa valeur standard ($T=25^{\circ}\text{C}$) mais l'irradiation varie de sa valeur standard ($1000\text{w}/\text{m}^2$) à $500\text{w}/\text{m}^2$ par pas de $150\text{w}/\text{m}^2$. On remarque, que dans ces conditions que la diminution de l'irradiation diminue les valeurs des courants de court circuit et des tensions à vide ainsi que la valeurs de la puissance maximale que peut développer le panneaux. Cependant, la puissance de crête qui est obtenue sous les conditions standards, elle est d'environ 11KW.

Pour les figures 2.9 et 2.10, elles représentent cette fois ci, les résultats de simulations obtenus sous une irradiation standard ($1000\text{w}/\text{m}^2$) et en faisant augmenter la température de 25°C à 55°C par pas de 10°C . Dans ce cas, on note que l'augmentation de la température, le courant de court circuit demeure presque constant par contre les tensions à vide ainsi que les points de puissances maximales diminuent en conséquence.

Finalement, les figures 2.11 et 2.12 regroupent les cas des variations de l'irradiation et de la température, respectivement, pour le courant en fonction de la tension et la puissance en fonction de la tension.

2.4 Convertisseurs statiques

2.4.1 Introduction

D'après le paragraphe précédent, on remarque qu'un générateur photovoltaïque (PV) génère une puissance qui varie fortement en fonction de l'éclairement, la température et du vieillissement global du système. Donc, pour adapter son comportement lorsqu'il est connecté à une charge, quelque soit sa nature (continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique). En effet, pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge tout en assurant grâce à une stratégie de control, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [1]. La figure 2.13 montre la structure de connexion d'un tel étage.

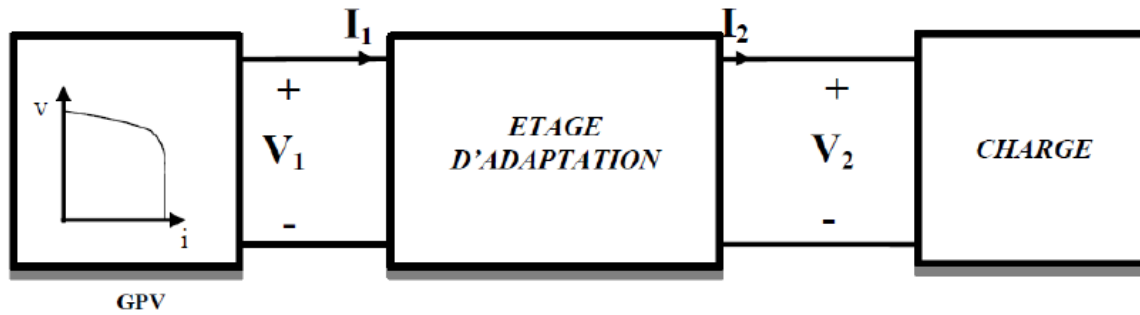


Figure 2.13 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et d'un semi conducteur de puissance (interrupteur). Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [25].

2.4.2 Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont souvent employées dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté. Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées pour les entrainements des moteurs à courant continu. Ces topologies sont classées en trois catégories : Abaisseurs (Buck); Élévateurs (Boost) et Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

2.4.2.1 Hacheur

Un hacheur est un convertisseur statique qui convertie une source continue à son entrée à une source continue à sa sortie. Il est appelé convertisseur DC/DC et caractérisé, en pratique, par deux (2) topologies principales : notamment, la topologie dite isolée et le Fly Back. Concernant la topologie isolée, elle nécessite un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence et elle est principalement utilisée pour les alimentations à découpage [26].

Par contre, la topologie Fly Back qui est non isolée et n'utilise pas de transformateur d'isolement, est principalement utilisée dans les entrainements des machines à courant continu et les chaînes des systèmes d'alimentation photovoltaïque [26]. Les convertisseurs de topologie non isolée sont classés en trois (3) catégories : abaisseur, élévateur et mixte (élévateur-abaisseur) et sont respectivement, appelés en anglais Buck, Boost.

Le tableau 2.1 présente les circuits et définit ces trois types de convertisseurs

Type d'hacheur	Schéma équivalent	Rapport de transformation	Application
Hacheur série		D	Convertie sa tension continue d'entrée (V_i) en une tension de sortie (V_o) inférieure à (V_i).
Hacheur parallèle		$\frac{1}{1-D}$	Convertie une tension continue d'entrée (V_i) en une autre tension continue de sortie (V_o) de valeur supérieure à (V_i).
Hacheur série-parallèle		$\frac{-D}{1-D}$	Convertie une tension continue d'entrée (V_i) en une tension continue de sortie (V_o) qui peut être supérieure ou inférieure à celle de l'entrée en fonction de D .

Tableau 2.1 Comparaison des principaux convertisseurs DC/DC

La topologie Buck est utilisée pour avoir une tension de sortie faible par rapport à celle de l'entrée. Dans les applications PV, elle est habituellement utilisée pour les chargeurs des batteries et les systèmes de pompage de l'eau. La topologie Boost est utilisée pour augmenter la tension

d'entrée. Les systèmes de production de l'énergie l'utilisent pour augmenter la tension de sortie au niveau de l'entrée de l'onduleur. Aussi, il y a des topologies qui sont capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost [27].

Selon les circuits correspondants aux topologies des types de convertisseurs considérées dans le tableau 2.1, on remarque que les semi conducteurs (désignés par K) nécessitent une commande de la base. Cependant, les périodes de fermeture (T_f) (bloqué : non passant) et d'ouverture (T_o) (passant) pour une période du cycle de commande (T_c) définit le rapport cyclique (D).

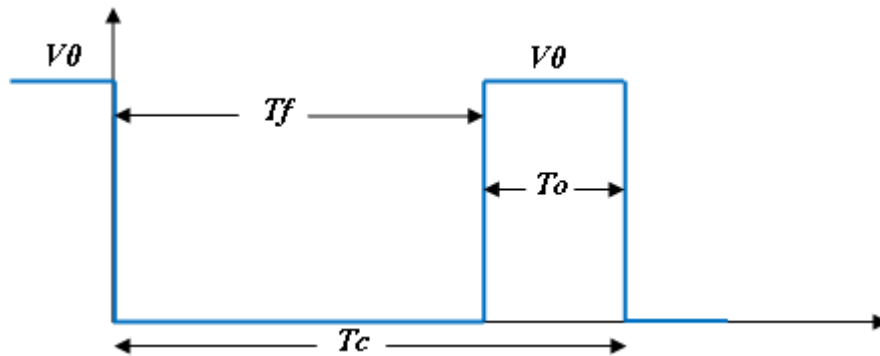


Figure 2.14 Périodes de fermeture et ouverture d'un interrupteur

Le rapport cyclique est alors exprimé par la relation suivante :

$$D = \frac{T_o}{T_c} \in [0 \ 1] \quad (2.15)$$

2.5 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

Les caractéristiques d'un module solaire montrent que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des irradiances solaires (E) et de la température (T). Cependant, des méthodes classiques et intelligentes permettent le suivi du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracking) ont été développées.

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power point Tracking) associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance [28,29]. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{MPP} , I_{MPP}). Par la suite, on va présenter dans le chapitre suivant quelques méthodes.

2.6 Onduleur pour PV

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques puissance qui transforment l'énergie continue en énergie alternative ayant une forme plus proche d'une sinusoïde pour que le taux d'harmonique soit très faible [2]. La figure 2.15 présente le symbole d'un tel convertisseur.

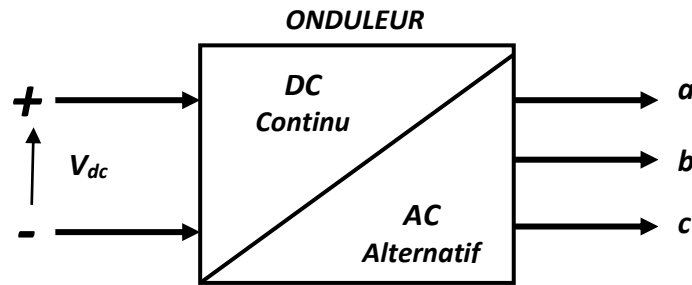


Figure 2.15 Symbole de convertisseur DC/AC (onduleur) triphasé

Pour les installations photovoltaïques couplées aux réseaux de distribution, l'onduleur permet de transformer le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif. Ce courant sera adapté, grâce à un circuit à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) à la fréquence de la tension du réseau [2, 28]. Par ailleurs, pour raccorder un système photovoltaïque au réseau de distribution, on distingue trois (3) classifications de couplage des onduleurs avec le réseau de distribution [28, 29, 32, 2], comme le montre la figure 2.16.

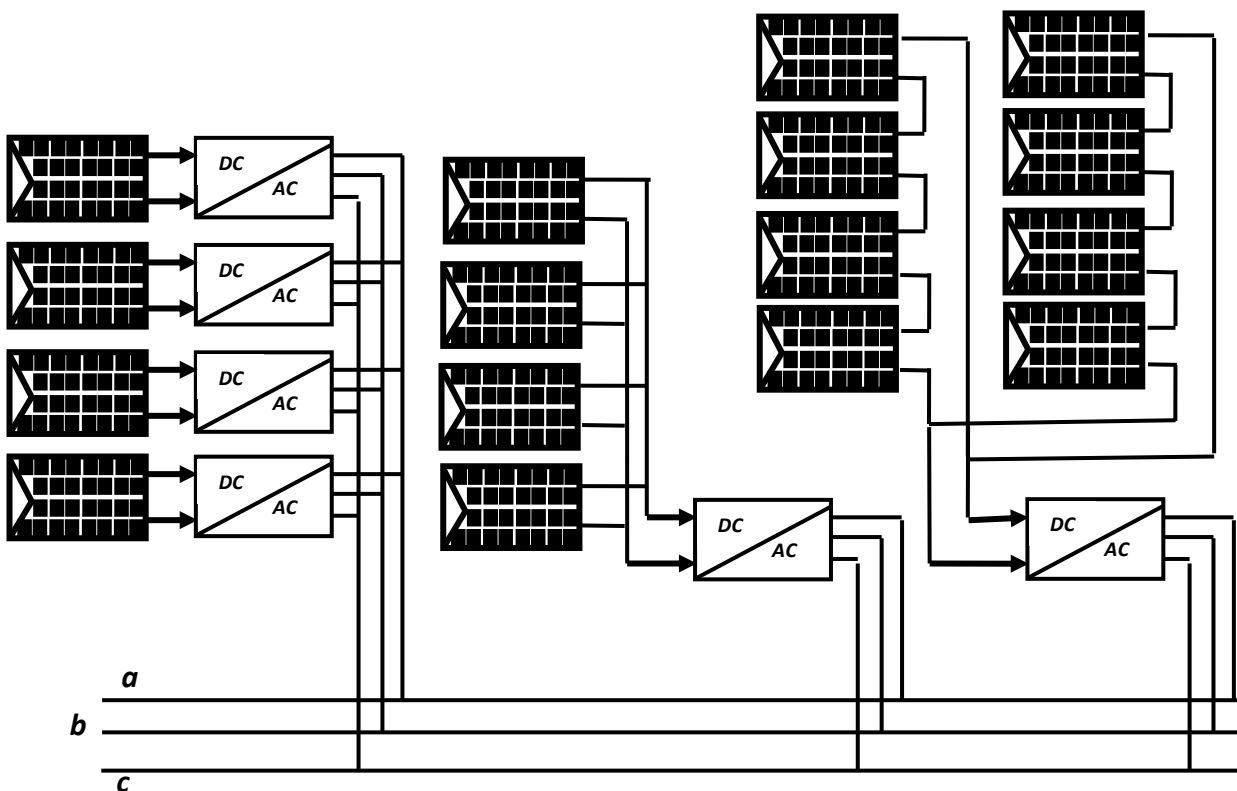


Figure 2.16 Classification des onduleurs PV connectés au réseau

- ✚ **Onduleurs modulaires** : chaque panneau solaire dispose d'un onduleur individuel qui lui est monté à proximité immédiate.
- ✚ **Onduleurs centralisés** : Ils sont destinés à transformer le courant continu produit par un champ photovoltaïque en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées en parallèle où chacune d'elle est constituée de plusieurs panneaux connectés en série.
- ✚ **Onduleurs en rangée**

Les onduleurs en rangée sont les plus recommandés pour les installations photovoltaïques de trois (3) KW de puissance. Toutefois, pour les fortes puissances, il est possible de connecter plusieurs onduleurs en rangées parallèles du côté du courant alternatif. L'intérêt dans cette conception est que si un onduleur est en panne, seule la perturbation de la rangée concernée est défectueuse.

2.6.1 Modélisation et structure d'un onduleur

Le schéma de la figure 2.12 présente un onduleur triphasé à structure de tension [33]. Il est composé de trois bras dont chacun est constitué de deux (2) semi conducteurs (interrupteurs) réversibles en courant (onduleur à 2 niveaux) [33] commandable à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode montée en antiparallèle, commandé de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode où les semi conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés n'existe que durant les commutations.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension U_{dc} ou à deux condensateurs avec un point milieu C_{dc1} , C_{dc2} [34, 2, 2.33]. Le filtre passif habituellement du premier ordre (L_f , R_f) est inséré pour raccorder l'onduleur de tension au réseau de distribution.

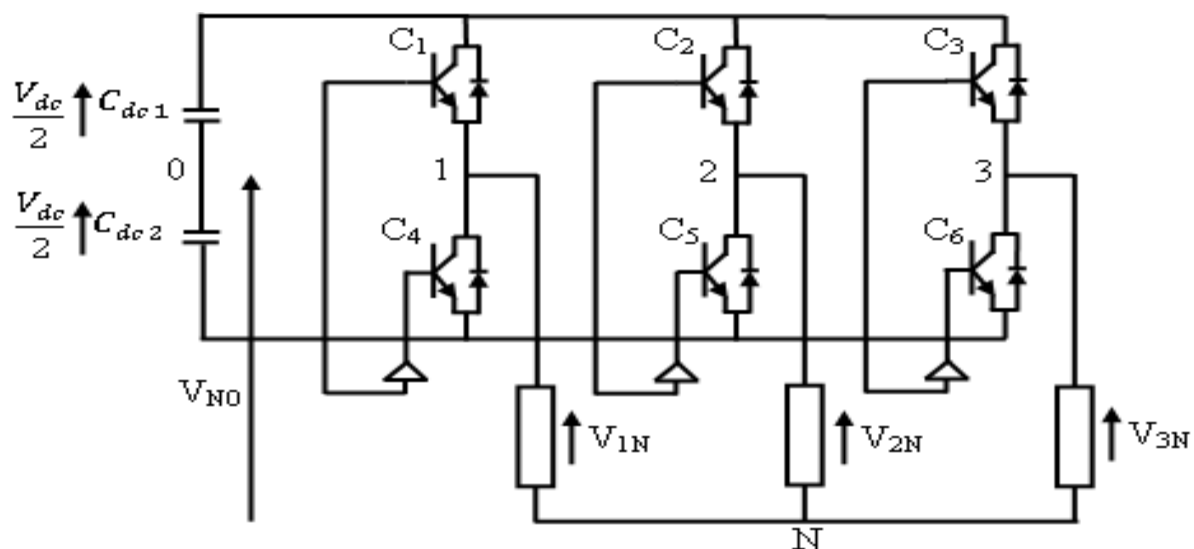


Figure 2.17 Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

On aura alors,

$$[V_{abc}] = V_{dc} \cdot [T] \quad (2.16)$$

Avec,

$[V_{abc}]$ est le système de tensions alternatives équilibré ;

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \quad (2.17)$$

$[T]$ est la matrice de transfert de l'onduleur ;

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions de formes les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées [35, 36]. Il s'agit de générer les ordres d'ouvertures et de fermetures des semi conducteur de manière que la tension à la sortie de l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux principales stratégies de commandes sont très utilisées [35] :

- **Commande par hystérésis**

Le principe de contrôle des courant par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants génères dans une bande enveloppant les courants de références. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation [2, 35, 36]. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutations bien que cette dernière soit inconnue. Le principe de la commande des semi conducteurs est illustré par la figure suivante :

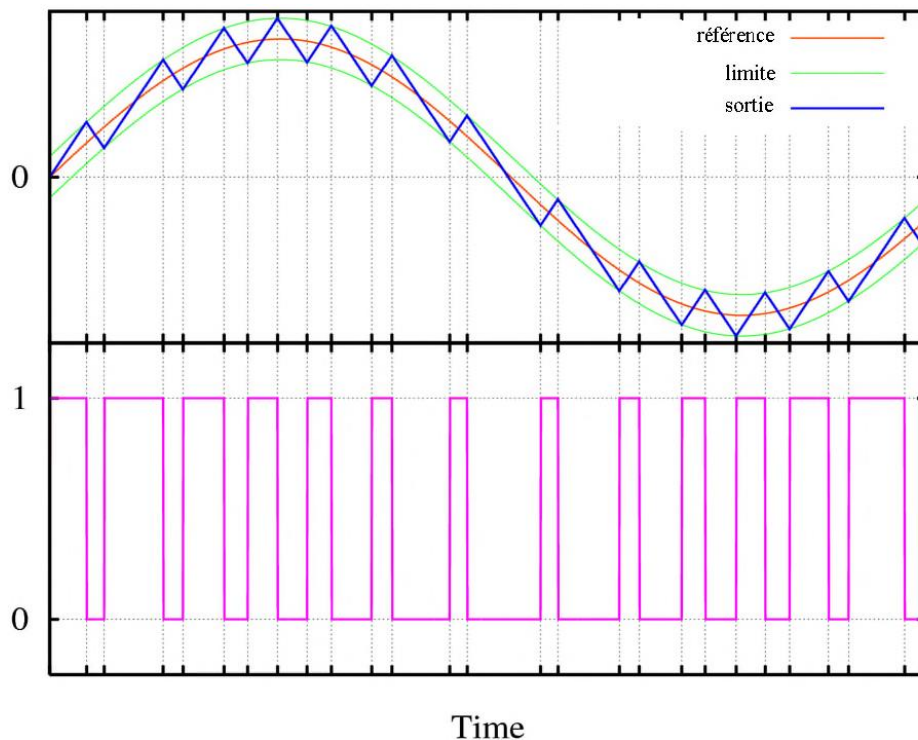


Figure 2.18 Commande des semi conducteurs par hystérésis

- **Commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI).**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsions (MLI) en anglais Pulse With Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance [2, 35, 36]. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire par une onde modulante sinusoïdale ayant une fréquence très basse.

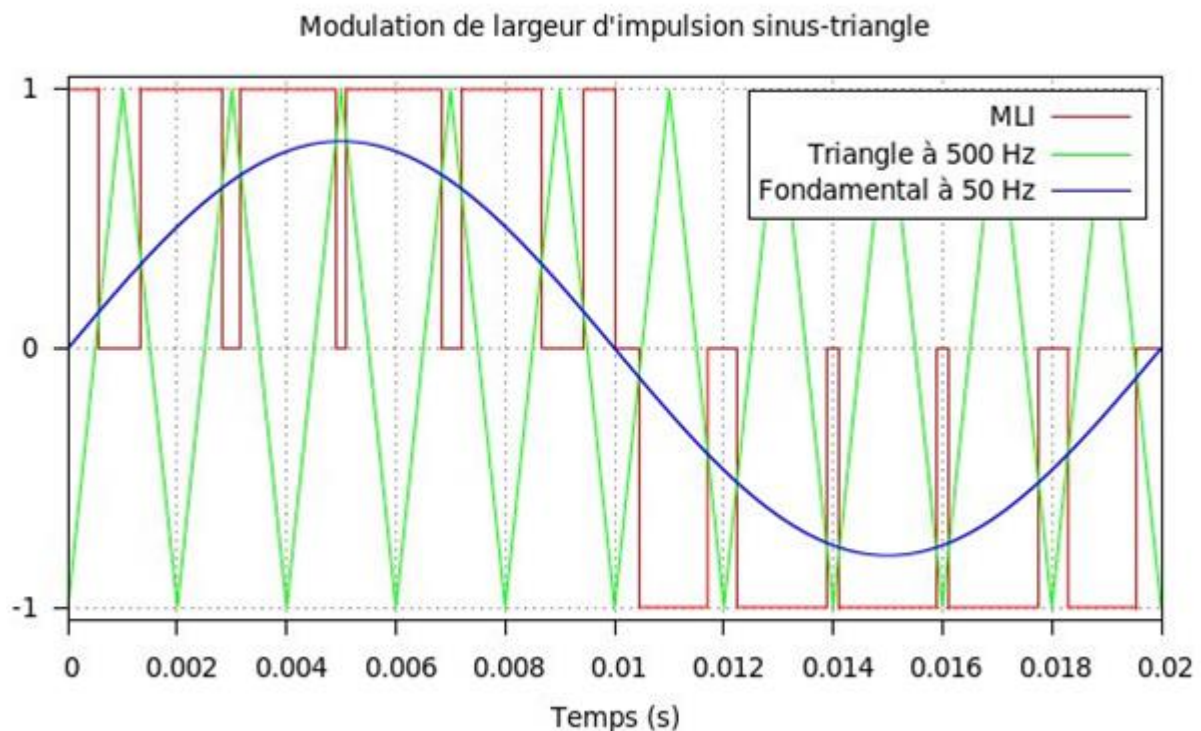


Figure 2.19 Stratégie de commande des semi conducteurs par MLI

Cette stratégie est caractérisée par deux(2) indices fondamentaux : l'indice de réglage (r) et celui de modulation (m) définis par (2.19) et (2.20), respectivement :

$$r = \frac{A_{ref_max}}{A_{por_max}} \quad (2.19)$$

A_{ref_max} : amplitude maximale du signal de référence ;

A_{por_max} : amplitude maximale du signal porteuse ;

Avec l'indice de réglage doit être $0.8 \leq r \leq 1$

$$m = \frac{f_{por}}{f_{ref}} \quad (2.20)$$

f_{por} : fréquence du signal porteuse ;

f_{ref} : amplitude maximale du signal de référence ;

Avec un m multiple de trois(3).

L'algorithme de commande en MLI pour un onduleur à deux niveaux est donné par (2.21) :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq V_{por} & \Rightarrow V_{ao} = +V_{dc} \\ V_{ref} \leq V_{por} & \Rightarrow V_{ao} = -V_{dc} \end{cases} \quad (2.21)$$

2.7 Réseau, filtre et PLL

2.7.1 Modélisation du réseau électrique

Les charges sont consommateurs d'énergie électrique en fonction de leurs caractéristiques.

$$\begin{cases} E_a(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(wt) \\ E_b(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ E_c(t) = E\sqrt{2} \cdot \sin(wt - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.22)$$

2.7.2 Modélisation du filtre

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution, un onduleur est nécessairement utilisé. Où, la connexion de cet onduleur au réseau s'effectue à travers un filtre RL, dont le schéma de principe est montré par la figure2.20.

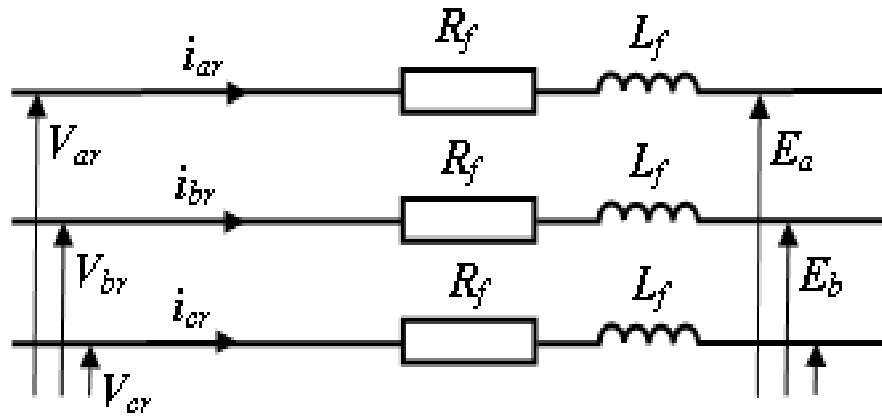


Figure 2.20 Schéma de principe du filtre RL

L'application de la loi des mailles pour chaque phase au point de raccordement du filtre donne les équations qui lient les tensions modulées par le convertisseur et les courants transitant à travers le filtre :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_f i_{ar} + L_f \frac{di_{ar}}{dt} + E_a \\ V_{br} = R_f i_{br} + L_f \frac{di_{br}}{dt} + E_b \\ V_{cr} = R_f i_{cr} + L_f \frac{di_{cr}}{dt} + E_c \end{cases} \quad (2.23)$$

D'où, sous forme de LAPLACE

$$\begin{cases} I_{ar} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{ar} - E_a) \\ I_{br} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{br} - E_b) \\ I_{cr} = \frac{1}{R_f + L_f \cdot S} (V_{cr} - E_c) \end{cases} \quad (2.24)$$

2.7.3 Circuit de synchronisation

Dans le but de réaliser la synchronisation du convertisseur (onduleur) avec le réseau électrique, une structure PLL a été utilisée. Son principe de calcul est montré par la figure 2.21.

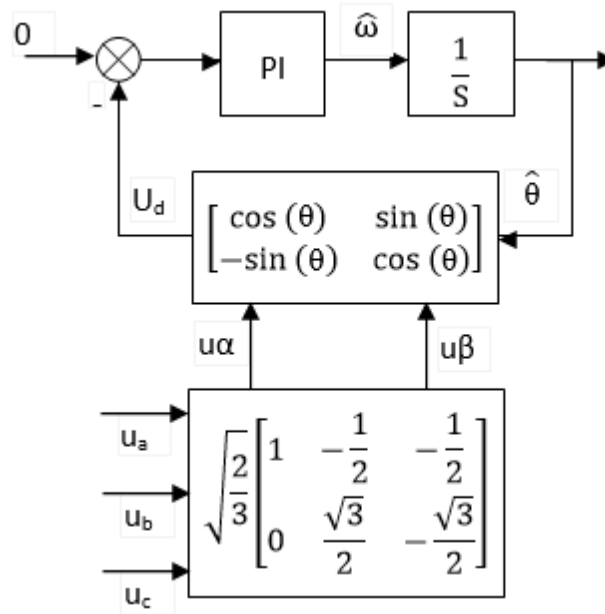


Figure 2.21 Schéma de principe d'une PLL

2.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré principalement à la définition, rôle et modélisation des différents constituants d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

Toutefois, les principes de fonctionnement du système solaire de production d'énergie est amplement développé notamment en termes de l'influence des conditions météorologique (irradiation et température) ainsi qu'à la manière des connexions des panneaux solaires (série, parallèle).

CHAPITRE 3

CONTROLE DE LA PUISSANCE MAXIMALE

3.1 Introduction

La puissance maximale que peut délivrer un panneau photovoltaïque dépend fortement des conditions météorologiques, notamment l'irradiation (ensoleillement) et la température. Dans ce chapitre, une stratégie de contrôle appliquée pour le suivi du point maximum de puissance en anglais maximum power point tracking (MPPT) délivrée par le panneau photovoltaïque est présentée.

Après un bref rappel sur le control MPPT, on présente la méthode de suivant du point de puissance maximale ainsi que son algorithme de calcul ainsi que les simulations réalisées à base du logiciel MatLab ainsi que les discussions des résultats.

3.2 Hacheur survolteur (Boost-converter)

Connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure 3.1 Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [1].

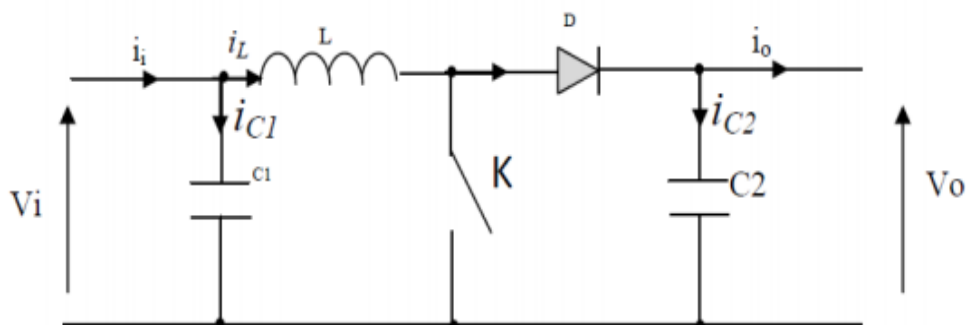


Figure 3.1 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (Boost). La figure 3.2 montre les configurations relatives aux deux phases de fonctionnement.

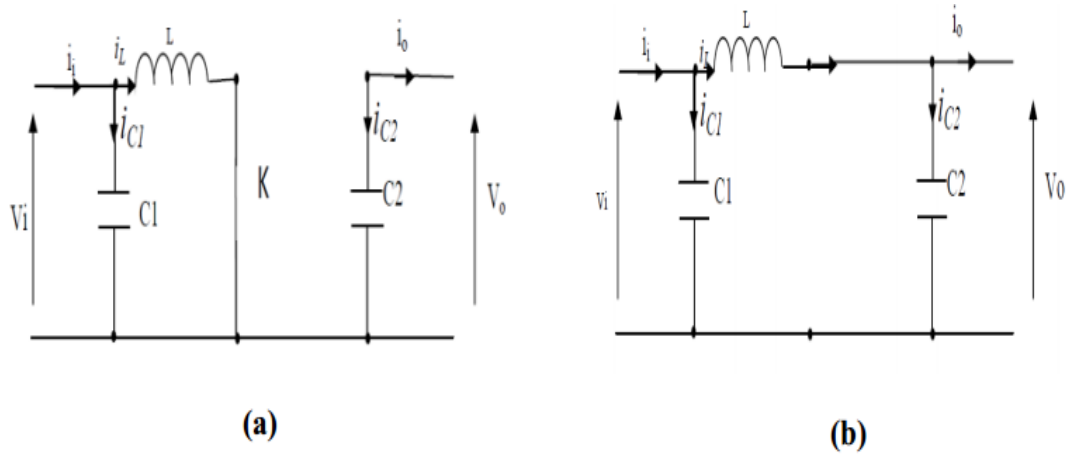


Figure 3.2 Schémas équivalents du hacheur survolteur: K (a) : fermé, (b) : ouvert

1^{ère} phase :

Elle correspond à la séquence de fonctionnement $(0 \leq t \leq DT_s)$.

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

2^{ème} phase :

Elle correspond à la seconde séquence de fonctionnement $(1 - DT_s)$ soit $(DT \leq t \leq T)$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1-d)T_s \quad (3.3)$$

En appliquant la relation (3.3) sur les systèmes d'équations (3.1) et (3.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière. Ainsi, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [2].

$$\begin{cases} i_l = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_o \end{cases} \quad (3.4)$$

Le convertisseur DC-DC joue le rôle d'adaptateur entre le GPV et la charge continue DC pour avoir un transfert maximal de puissance. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du point de puissance maximale (PPM) quelque soient les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, etc.).

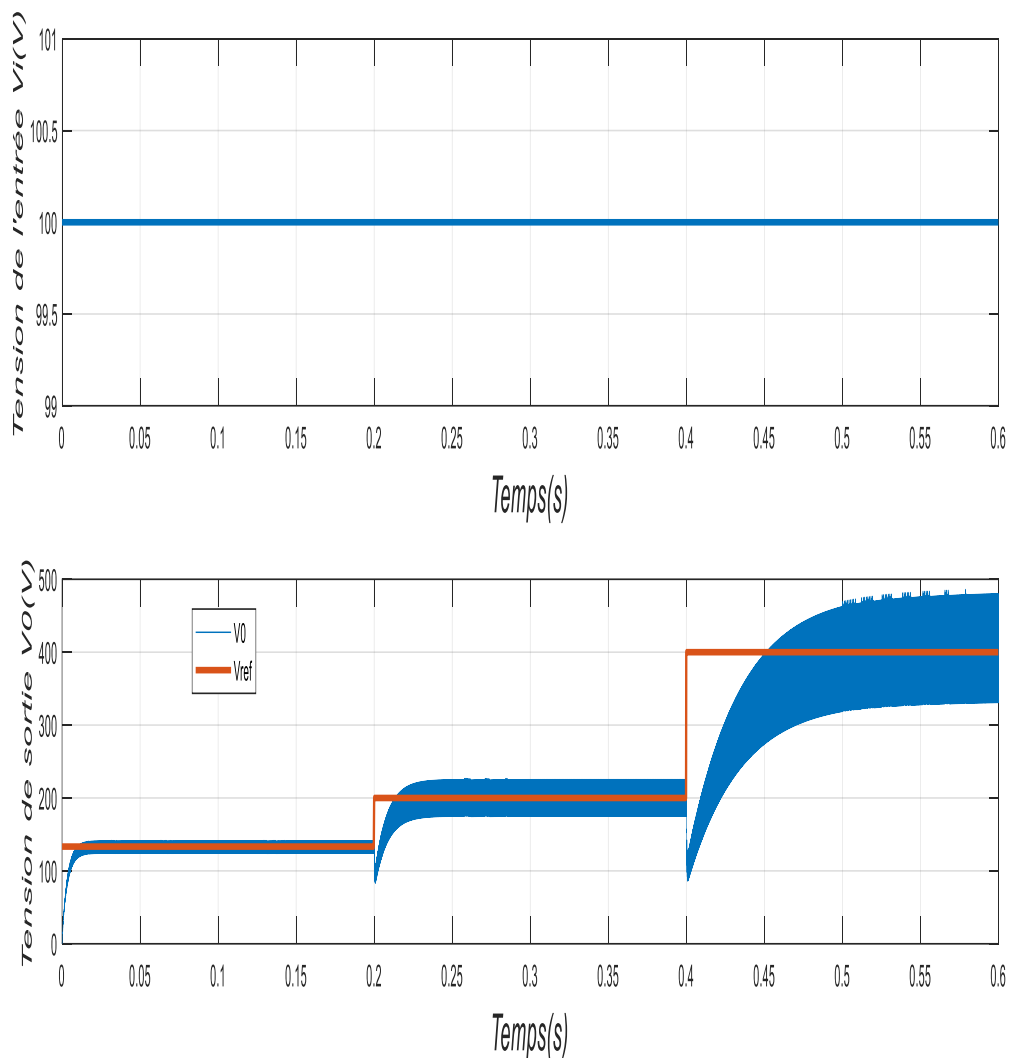


Figure 3.3 Tension d'entrée (V_i) et tension de sortie (V_o) d'un hacheur Boost

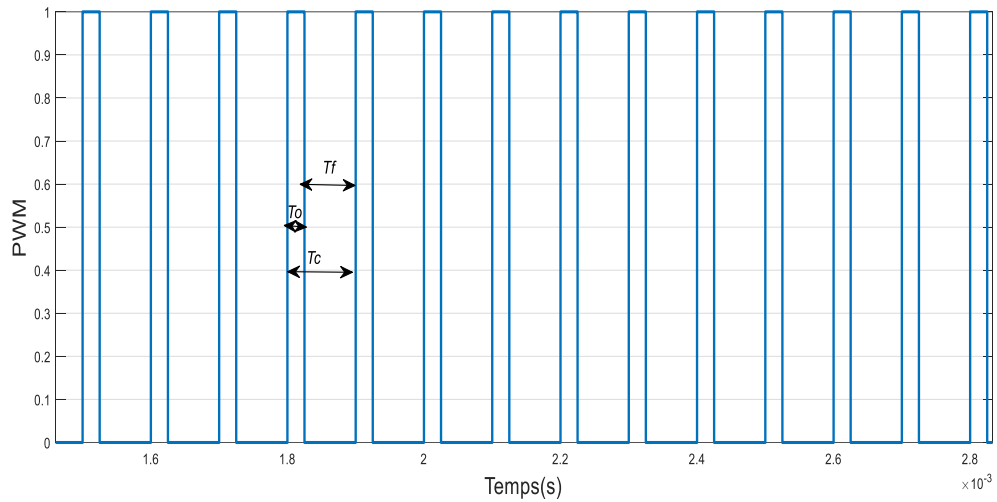


Figure 3.4 Commande PWM avec $D=0.25$

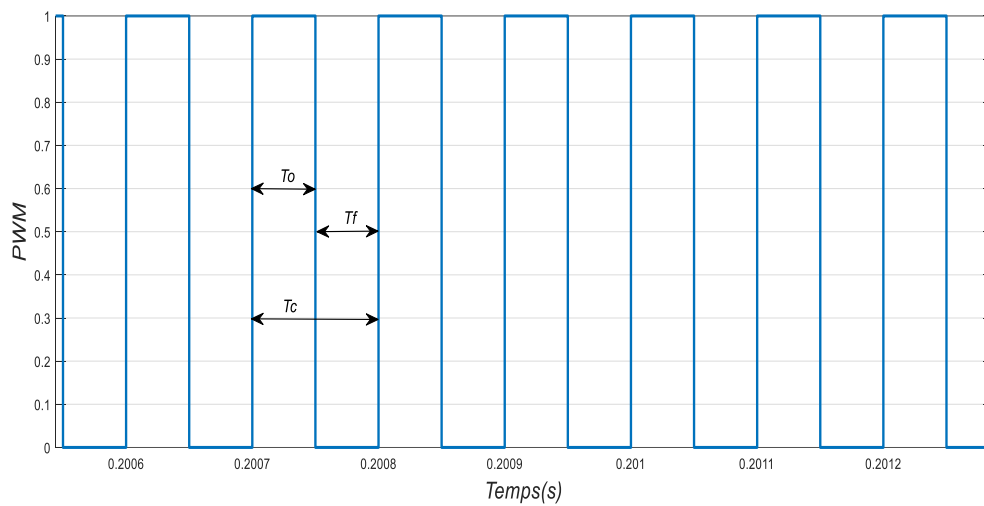


Figure 3.5 Commande PWM avec $D=0.5$

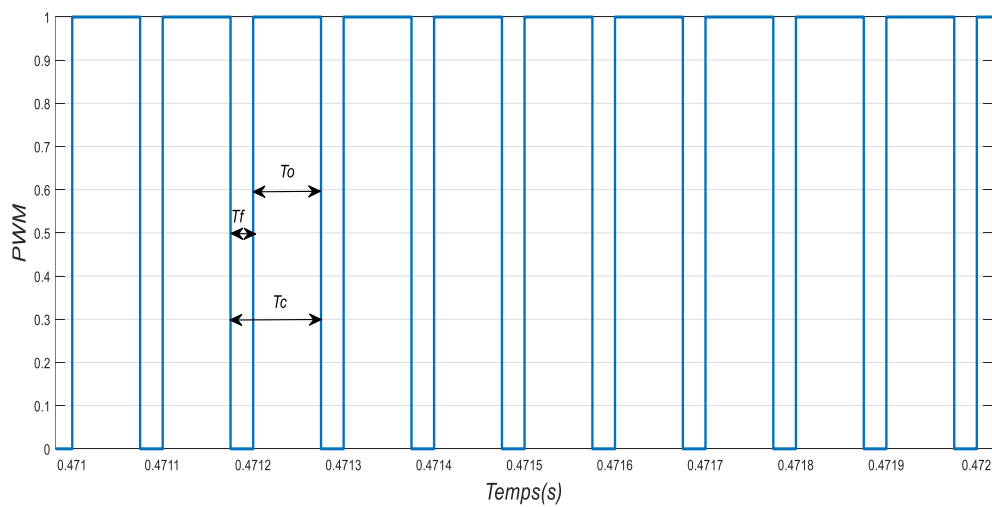


Figure 3.6 Commande PWM avec $D=0.75$

3.3 Principe de la méthode

La stratégie de contrôle de la puissance de sortie maximale du panneau où autrement la puissance maximale que peut délivrer un panneau photovoltaïque sous une irradiation et une température données, exige généralement les mesures des tensions (V_{pv}) et courant (I_{pv}) du panneau afin de déduire la valeur du rapport correspondant pour la commande du semi-conducteur du hacheur. La configuration du système étudié est présentée par la figure 3.7. Elle comprend, principalement, un panneau solaire, une capacité de filtrage (C), l'hacheur (H), la charge et le bloc MPPT.

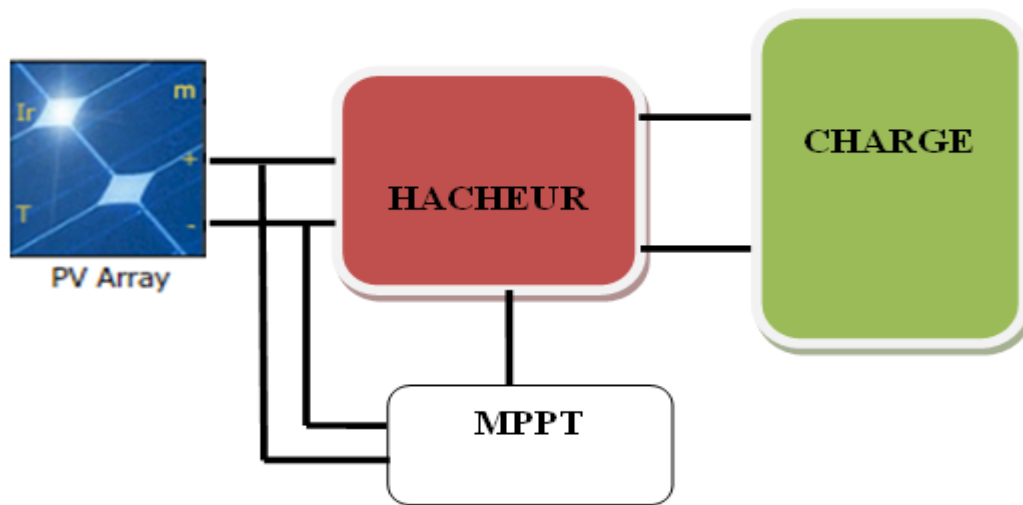


Figure 3.7 Structure de commande du MPPT

3.4 Techniques du suivi du point maximum de puissance

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir le point de puissance maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque. Les premières utilisations du MPPT datent de 1968. Il s'agit d'un genre de contrôleur qui va forcer le générateur à travailler à sa puissance maximale. Ces méthodes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur robustesse. Parmi les méthodes, on considère celle dite perturbation et observation (P&O).

La méthode P&O est très souvent exploitée et citée, due à sa simplicité. Elle repose sur un procédé algorithmique dans le but de la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Ce procédé se base sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur, ou on agit directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie. Donc, suite à une perturbation de tension, la puissance augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPPT.

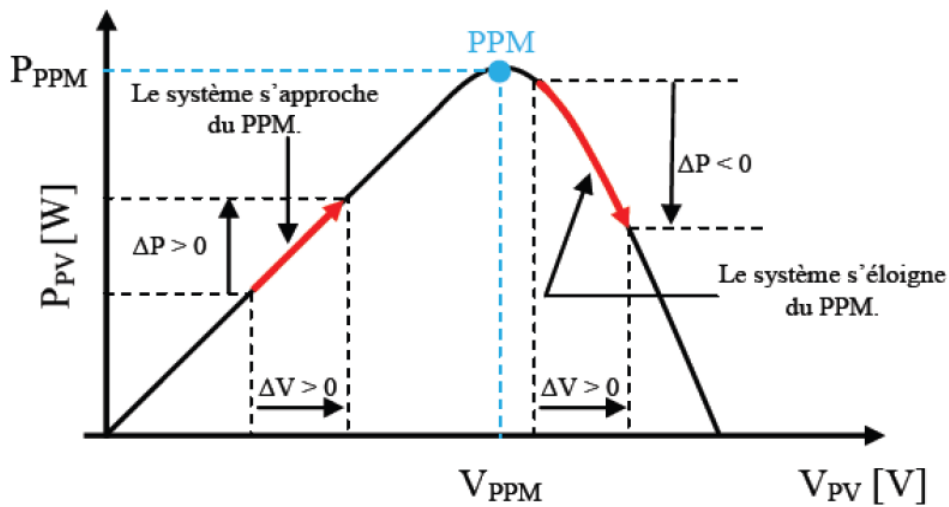


Figure 3.8 Caractéristique puissance-tension $P=f(V)$ d'un panneau photovoltaïque.

La figure 3.9 illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant.

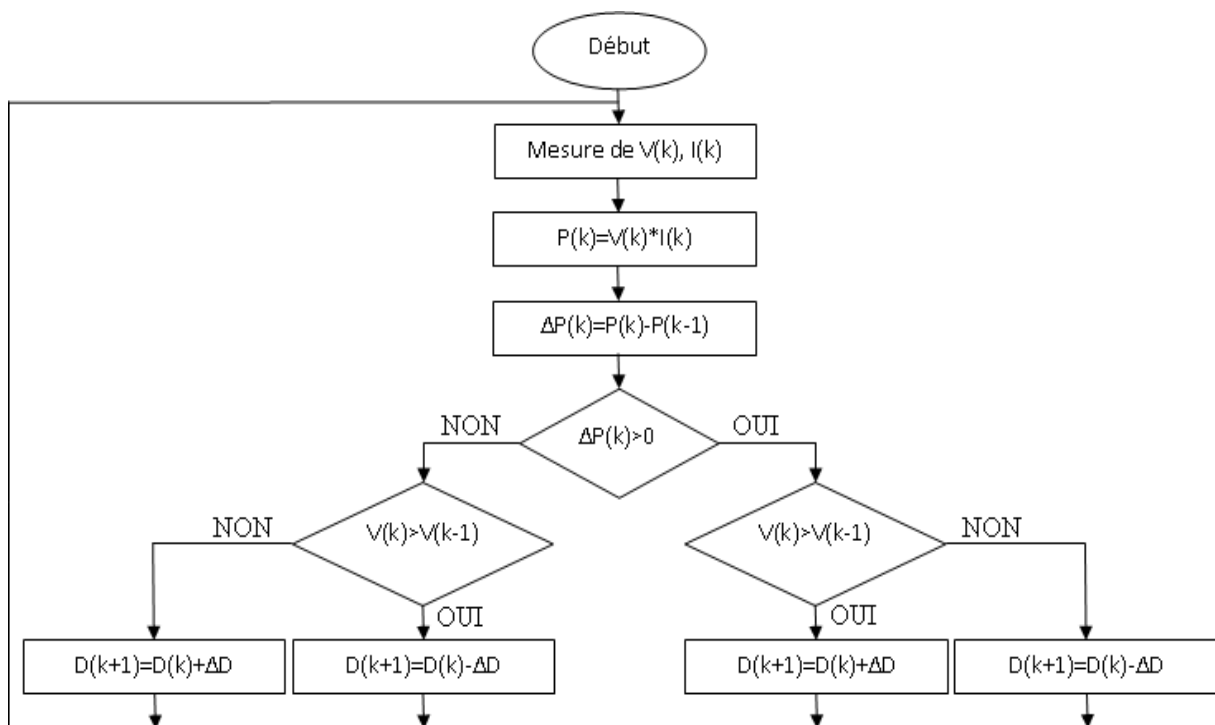


Figure 3.9 Algorithme de la méthode P&O

Afin de valider l'organigramme que nous avons programmé et simulé sous l'environnement MATLAB Simulink. Les tests de simulations suivants ont été considérés :

- **Irradiation E variable et température constante $T=25^{\circ}\text{C}$**

Pour des valeurs de $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$, $850\text{W}/\text{m}^2$, $700\text{W}/\text{m}^2$, $650\text{W}/\text{m}^2$, $500\text{W}/\text{m}^2$, on a présenté les résultats de simulations (voir les figures 3.10 et 3.11) qui montrent que notre panneau délivre le maximum de puissance comme l'indiquent les figures des caractéristiques du panneau.

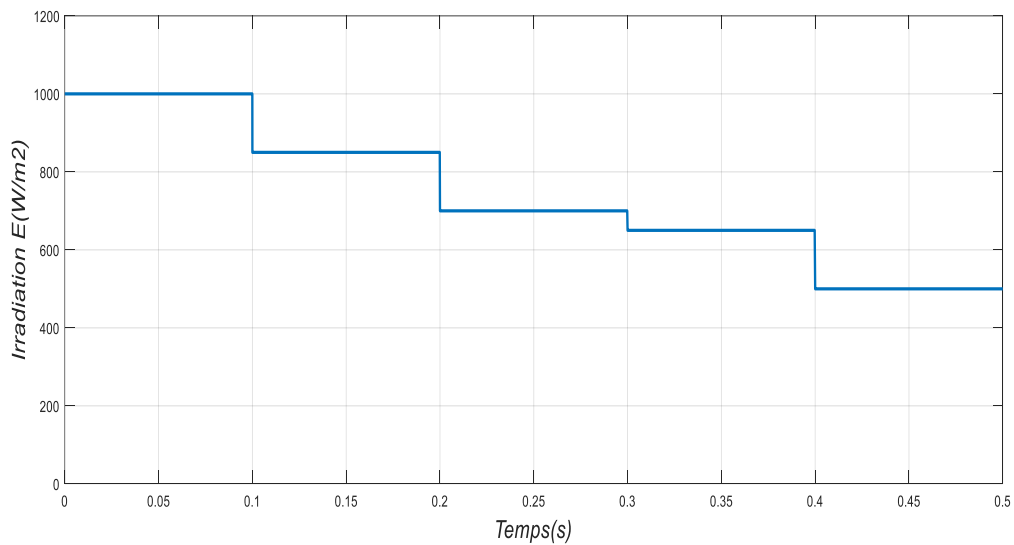


Figure 3.10 Variation de l'irradiation E et la température constante $T=25^{\circ}\text{C}$

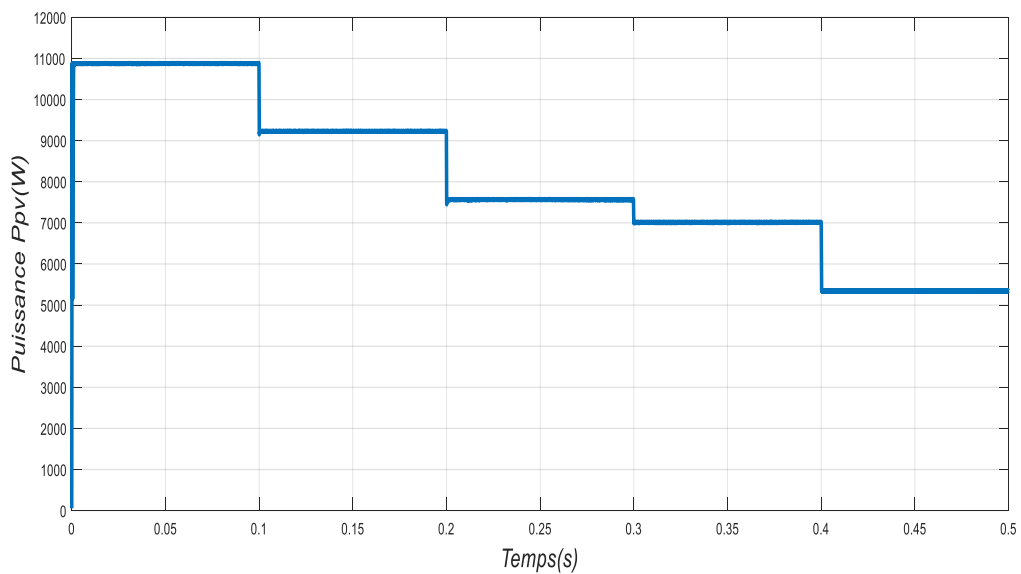


Figure 3.11 MPP avec variation de E et $T=25^{\circ}\text{C}$

- **Température variable et irradiation constante $E=1000W/m^2$**

Dans ce cas on garde E constant mais on varie les valeurs de la température : $T= 25^\circ C$, $35^\circ C$, $45^\circ C$, $55^\circ C$. Les figures 3.12 et 3.13 présentent l'évolution de la température et de la puissance fournie par le panneau.

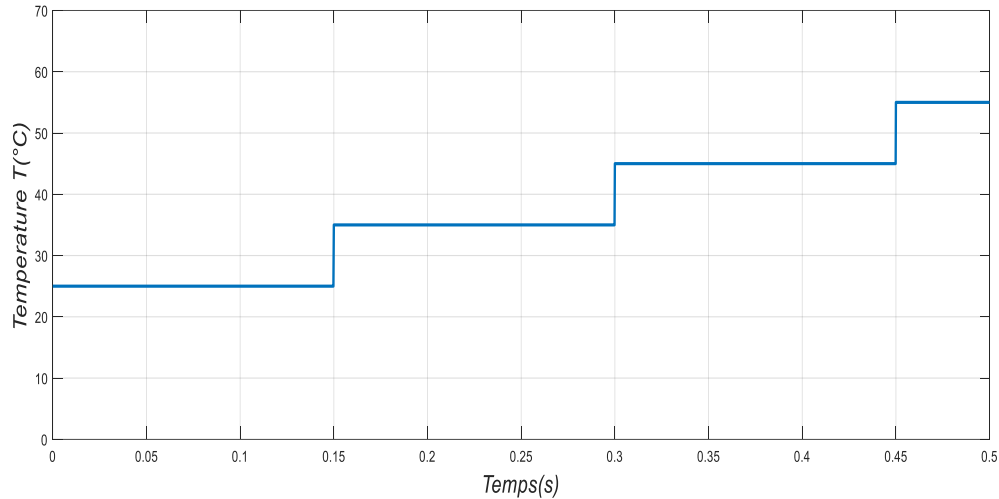


Figure 3.12 Variation de la température et l'irradiation constante $E = 1000W/m^2$

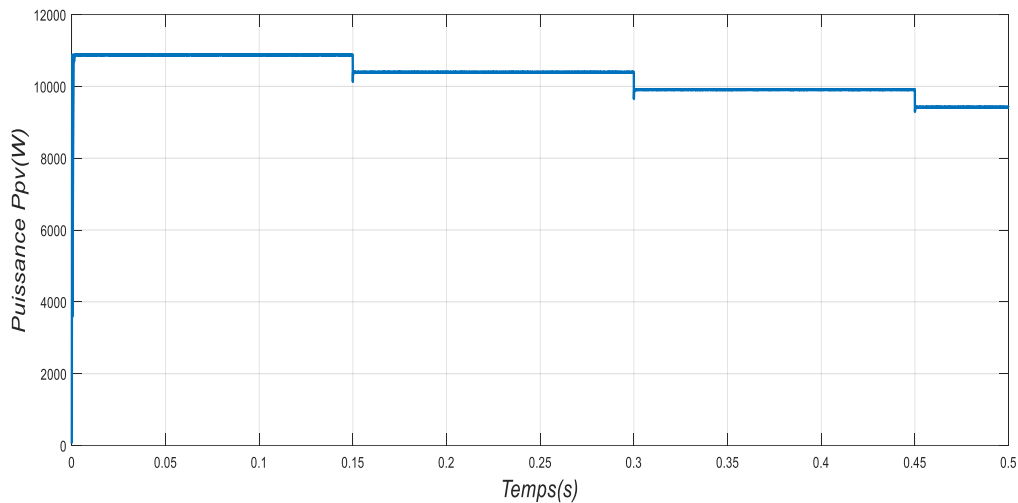


Figure 3.13 MPP avec variation de T et $E = 1000W/m^2$

3.5 Conclusion

En vu d'appliquer cette technique d'optimisation pour le suivi de la puissance maximale délivrée par le panneau quelques soient les variations de l'irradiation et de la température, nous allons dans la suite de ce travail l'insérer pour la commande du hacheur élévateur de la chaine étudiée.

CHAPITRE 4

GESTION DE PUISSANCES ET STOCKAGE D'ENERGIE

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la gestion de la puissance délivrée par le panneau solaire, celle du réseau de distribution et de la puissance absorbée par la charge. Le contenu du chapitre comprend principalement deux (2) parties, où dans la première on ne considère pas le dispositif du stockage et la seconde partie fera l'objet de l'étude des spécificités du fonctionnement d'une batterie, puis son insertion en tant qu'élément de stockage sensé à être chargée et déchargée selon les conditions de fonctionnement.

4.2 Connexion chaîne photovoltaïque réseau de distribution

On rappelle que dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, la chaîne étudiée comprend, principalement un panneau photovoltaïque, un hacheur, une commande MPPT, un onduleur triphasé avec un raccordement au un réseau de distribution. L'onduleur et le réseau sont reliés simultanément à une charge triphasée de puissance active 10KW. La figure 4.1 présente la structure de la chaîne de conversion globale.

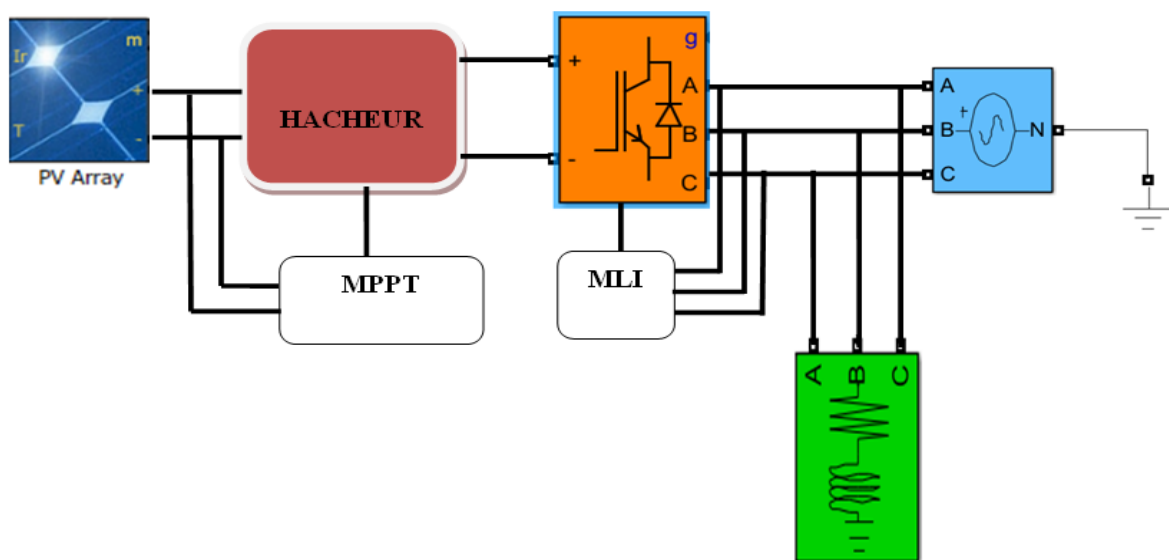


Figure 4.1 Structure de la chaîne de conversion

Ceci étant, on étudiera dans la section suivante le comportement de l'ensemble sous des conditions météorologiques choisies de manière à montrer l'échange de puissance entre les différents éléments de chaîne.

4.2.1 Simulation de la chaîne

La chaîne dans son ensemble a été programmée dans l'environnement MATLAB Simulink. Cependant, afin de valider le fonctionnement désiré, on a considéré que la température reste constante mais que l'irradiation varie. En effet, durant l'intervalle du temps de 0 à 0.1 seconde, on a supposé que l'irradiation (E) et la température (T) sont dans les conditions standards soit respectivement $E=1000\text{w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$. Puis de 0.1s à 0.2s l'irradiation diminue jusqu'à 650w/m^2 et finalement s'annule durant le laps de temps 0.2s à 0.3s, comme le montre la figure 4.2. Cependant, , sous ces conditions les allures des puissances actives et réactives de la charge sont illustrées par la figure 4.3.

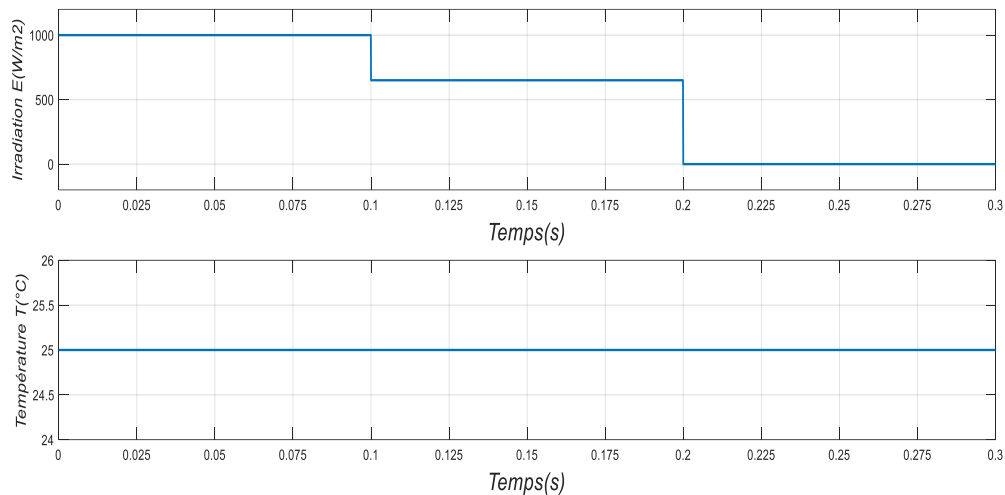


Figure 4.2 Conditions météorologiques (E variable et T constante)

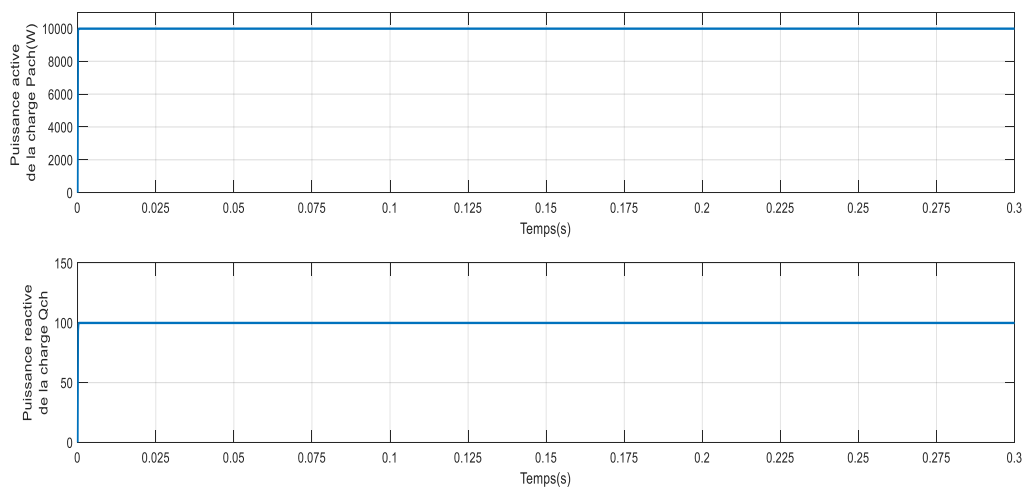


Figure 4.3 Puissance active P et réactive Q de la charge

Alors, on tenant compte des caractéristiques $P=f(V)$ présentées précédemment par la figure 2.8 du deuxième chapitre et celle des puissances représentées par la figure 4.4: la puissance active de la charge (P_{ch}), la puissance délivrée par le panneau (P_{pv}), la puissance du réseau de distribution (P_r) et enfin l'allure de la somme du ($P_{pv}+P_r$), on remarque que durant le premier intervalle (0s-0.1s) et qu'après un régime transitoire, le panneau solaire développe une puissance supérieure à celle demandée par la charge donc toute la puissance consommée par la charge est assurée exclusivement par le panneau (courant du réseau nul). Entre 0.1s et 0.2, puisque l'irradiation a chuté jusqu'à 650W/m^2 le panneau ne pourra délivrer qu'une puissance maximale de 7KW donc inférieure à celle demandée par la charge. Ainsi, le réseau entre en action pour délivrer à la charge la quantité de puissance manquante (3KW) ce qui est constaté par l'augmentation de l'amplitude des courants de phases du réseau. Pour le deuxième intervalle 0.1s-0.2s, on a une diminution remarquable d'irradiation jusqu'à 650W/m^2 , ce qui fournit une puissance de 7KW . Dans ce cas, la charge prend le complément de ses besoins à partir du réseau, nous remarquons une addition des puissances du panneau= 7KW et 3KW délivrée par le réseau pour satisfaire les besoins de notre charge, ce qui est montré par l'augmentation de l'amplitude des courants de phases du réseau. Finalement pour le dernier intervalle 0.2s-0.3s le niveau d'irradiation est à 0W/m^2 , donc le panneau ne délivre pas de puissance et donc la puissance exigée par la charge et totalement assurée par le réseau.

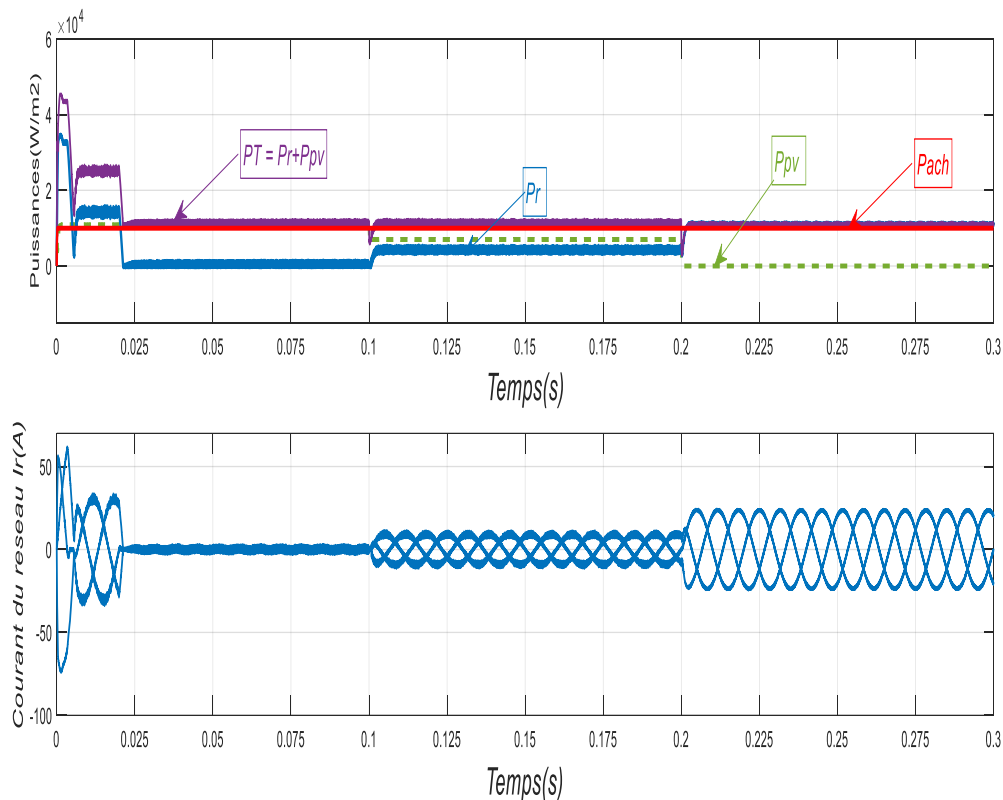


Figure 4.4 Echange de puissance entre le panneau et le réseau

4.3 Stockage

Les panneaux solaires génèrent de la puissance le jour en fonction, principalement, des conditions météorologiques (irradiation, température) mais pas la nuit. Comme il y a des périodes où la charge demande moins d'énergie que les panneaux solaires fournissent, il est alors nécessaire et avantageux de prévoir un système de stockage d'énergie. Ainsi, l'excès d'énergie produite par rapport à celle dont a besoin la charge serait stockée (chargement des batteries) et quand l'énergie demandée par la charge est supérieure que celle que peut fournir les panneaux, l'énergie stockée serait utilisée comme complément (déchargement des batteries) afin que la charge reçoive de l'énergie demandée quelque soient les conditions. Au final, l'énergie stockée pourra être consommée par la charge aux moments adéquats.

Les batteries sont des périphériques de stockage qui exigent, continuellement, de nombreux efforts pour améliorer leur fonctionnement. Parmi les caractéristiques importantes des batteries, on distingue [37] : la résistance interne (R_i), la tension à vide (E_0), la tension nominale, la tension de fin de décharge, la capacité, le taux de décharge et recharge, la profondeur de décharge, l'influence des paramètres extérieurs, la durée de vie et nombre de jours d'autonomie.

Par ailleurs, exprimée en pourcentage l'état de charge (acronyme est SOC de l'anglais state-of-charge) renseigne sur le niveau de charge de la batterie afin d'éviter les décharges profondes ou les charges excessives qui abîmeront les batteries. Cette observation a pour objectif de ralentir la dégradation de la batterie afin d'allonger au maximum sa durée de vie. Le SOC peut être défini par la capacité disponible exprimée en fonction de la capacité nominale [37], comme l'exprime l'équation suivante :

$$SOC = \frac{\text{Capacité disponible [AH]}}{\text{Capacité nominale [AH]}} * 100\% \quad (4.1)$$

4.3.1 Modélisation de la batterie

La batterie peut être représentée par son circuit équivalent [1] montré par la figure 4.5.

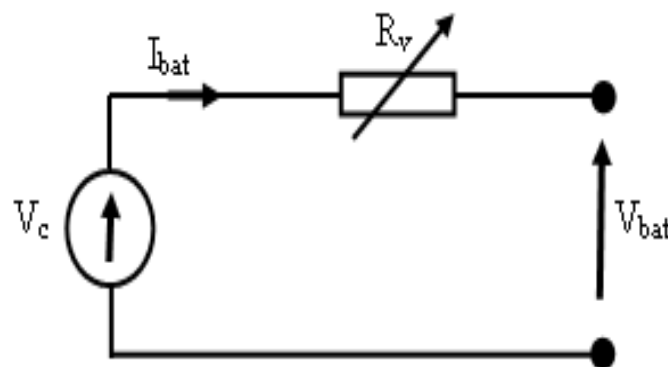


Figure 4.5 Modèle R-C de la batterie

Où,

V_c : source de tension idéale d'entrée ;

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie ;

I_{bat} : courant développé par la batterie ;

R_v : résistance interne variable de la batterie ;

Avec,

$$R_v = R_i + k \frac{C}{C - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (4.2)$$

R_i : résistance interne ;

k : tension de polarisation ;

C : capacité de la batterie ;

De la figure 4.5, on déduit l'équation de la tension aux bornes de la batterie, suivante:

$$V_{bat}(t) = V_c - R_v I_{bat}(t) \quad (4.3)$$

Et, l'état de charge (EDC) de la batterie est :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (4.4)$$

Avec,

C_{bat} : capacité nominale de la batterie ;

Q_d : quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

En littérature, deux (2) types d'accumulateurs sont distingués [37], notamment : ceux contenant une réaction chimique irréversible donc non rechargeables et ceux dont la réaction est réversible sont rechargeables. On y trouve, le modèle le plus populaire les piles rechargeables.

Dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, nous nous sommes intéressés au stockage réversible (chargement, déchargement), en vue de le considérer dans la configuration du système étudié (système photovoltaïque, hacheur, bus continu, batterie, onduleur, réseau, charge). A cet effet, le système de stockage doit se charger et se décharger adéquatement donc nécessite un système de charge et décharge.

4.3.2 Régulation de la charge/décharge

L'utilisation d'un système de stockage (batterie) dans les systèmes solaires amène à choisir des batteries à faible autodécharge (< 5%), faible maintenance et une durée de vie supérieure à 5 ans [1]. Puisque, elles sont branchées en permanence sur le système photovoltaïque il est nécessaire de prévoir un régulateur de charge/décharge afin d'éviter le problème de surcharge, limiter la profondeur de décharge et par conséquent prolonger la durée de vie de la batterie. A cette fin, un régulateur de charge doit être monté dans le système photovoltaïque pour maintenir la batterie dans un état voisin de la pleine charge 80% de la capacité de la charge [1]. D'autre part, la profondeur de décharge doit être limitée pour augmenter la durée de vie, il ne faut pas descendre au-dessous de la capacité de la batterie [1]. Cependant, dans notre cas, un convertisseur bidirectionnel **Buck- Boost** est prévu. Ce dernier fonctionne en mode Boost (élévateur) lorsque la batterie se décharge et il fonctionne en mode Buck (abaisseur) pour se charger.

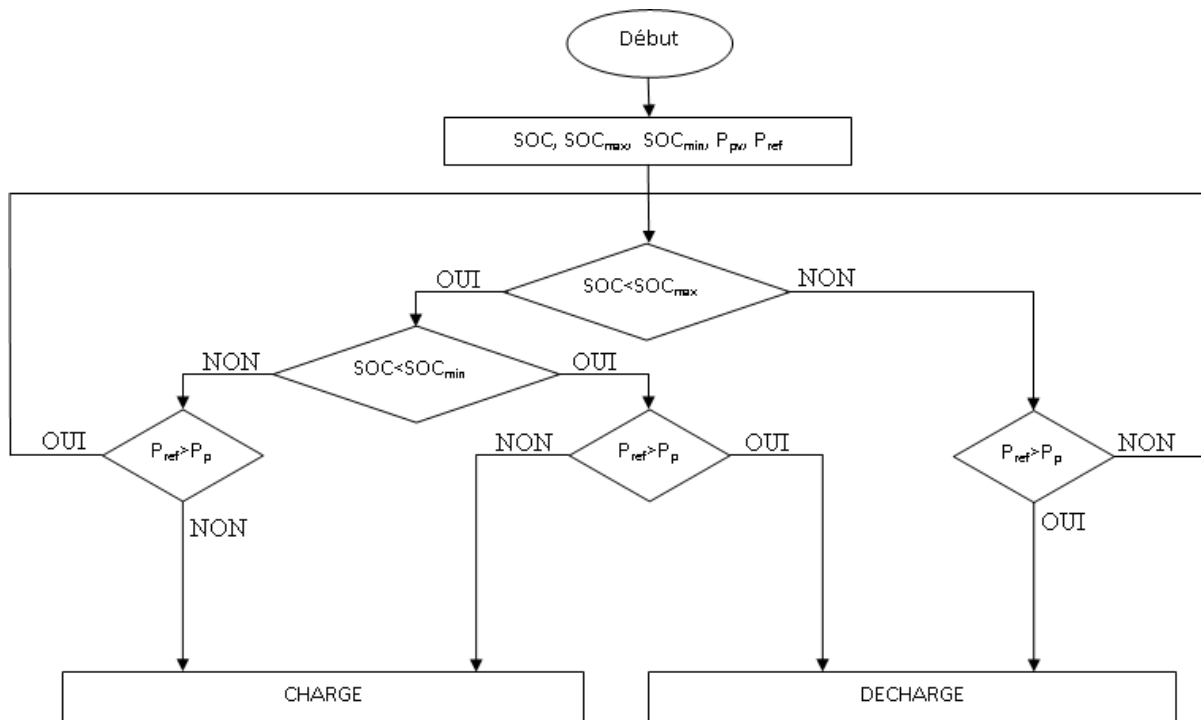


Figure 4.6 Organigramme du fonctionnement de la batterie (charge/décharge)

4.3.3 Convertisseur Bidirectionnel Buck-Boost

Les hacheurs réversibles permettent l'inversion du courant ou de la tension. Dans cette catégorie, on distingue :

Hacheur réversible en tension (deux quadrants) : C'est uniquement la tension appliquée à la charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.

Hacheur réversible en courant (deux quadrants) : C'est uniquement le courant de charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.

Le circuit de montage du convertisseur Buck- Boost pour la charge et décharge de la batterie est représenté par la figure 4.6.

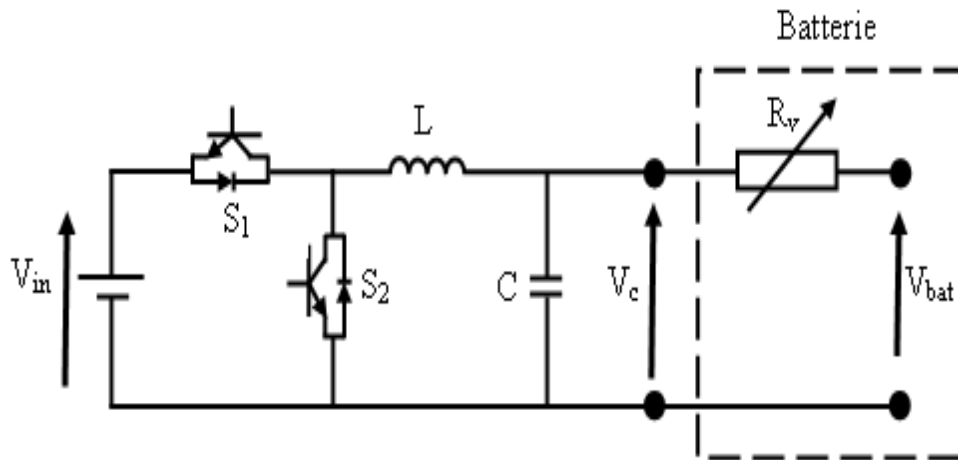


Figure 4.7 Schéma du montage du convertisseur Buck –Boost

4.3.4 Dimensionnement du régulateur

On utilise un régulateur proportionnel intégral (PI) pour réguler le courant. La nouvelle entrée U qui représente la sortie du régulateur est définie comme :

$$u = L \frac{di_L}{dt} \tag{4.5}$$

En utilisant la transformé de Laplace, on obtient :

$$u = L \cdot s i_L \tag{4.6}$$

Soit G la fonction de transfert du courant en boucle ouverte :

$$G = \frac{i_L}{u} = \frac{1}{s \cdot L} \tag{4.7}$$

Le régulateur va élaborer la commande du convertisseur à partir du signal de l'écart entre la référence I_{Lref} et le courant dans l'inductance I_L .

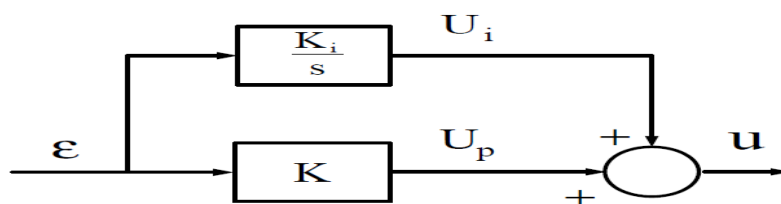


Figure 4.8 Schéma du régulateur PI

La fonction de transfert du régulateur :

$$C(S) = K + \frac{K_i}{S} \quad (4.8)$$

La loi de commande est donnée par :

$$V_{in} = V_c + L \frac{di_L}{dt} \quad (4.9)$$

D'après le modèle d'état, on obtient

$$u = L \frac{di_L}{dt} = V_{in} - (1-D)V_c \quad (4.10)$$

$$D = 1 + \frac{u - V_{in}}{V_c} \quad (4.11)$$

On utilise, la technique MLI pour générer les impulsions de commande correspondante à D déterminé.

Le circuit fonctionne en mode Boost quand la batterie se décharge et en mode Buck quand elle se charge.

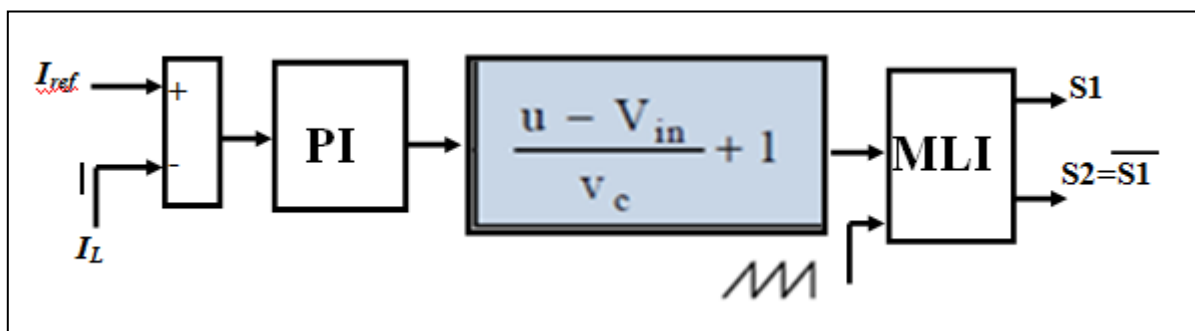


Figure 4.9 Schéma de la commande du convertisseur Buck-Boost

A partir d'une source de tension contrôlée V_{in} , on commande le convertisseur Buck-Boost en comparant le courant mesuré avec le courant de référence. Cependant, lorsque le courant de référence est négatif, on décharge la batterie et lorsqu'il est positif, on la recharge.

4.4 Choix de la batterie

On considère une tension d'entrée contrôlée $V_{in}=800V$ et on impose des courants de références de $-15A$, $+25A$, $+10A$ et $-30A$, respectivement (si $i_{ref} < 0$, on décharge la batterie et si $i_{ref} > 0$, on la recharge) afin d'étudier la capacité de contrôler la charge et de décharge de la batterie. En modifiant pour chaque simulation la tension nominale de la batterie (Lithium Ion) de la bibliothèque logiciel MATLAB, avec comme valeur : $V_{bat}=300 V$, $V_{bat}=600 V$, $V_{bat}=1000V$, $V_{bat}=1200V$ et un état initiale de charge $SOC=70\%$

4.4.1 Résultat de simulation

Les résultats de simulations obtenus sont représentés par les figures (4.4, 4.5, 4.6 et 4.7). Elles présentent le SOC, les courants et les tensions de la batterie sous l'effet de la variation de la tension nominale de la batterie par rapport à celle de l'entrée du convertisseur.

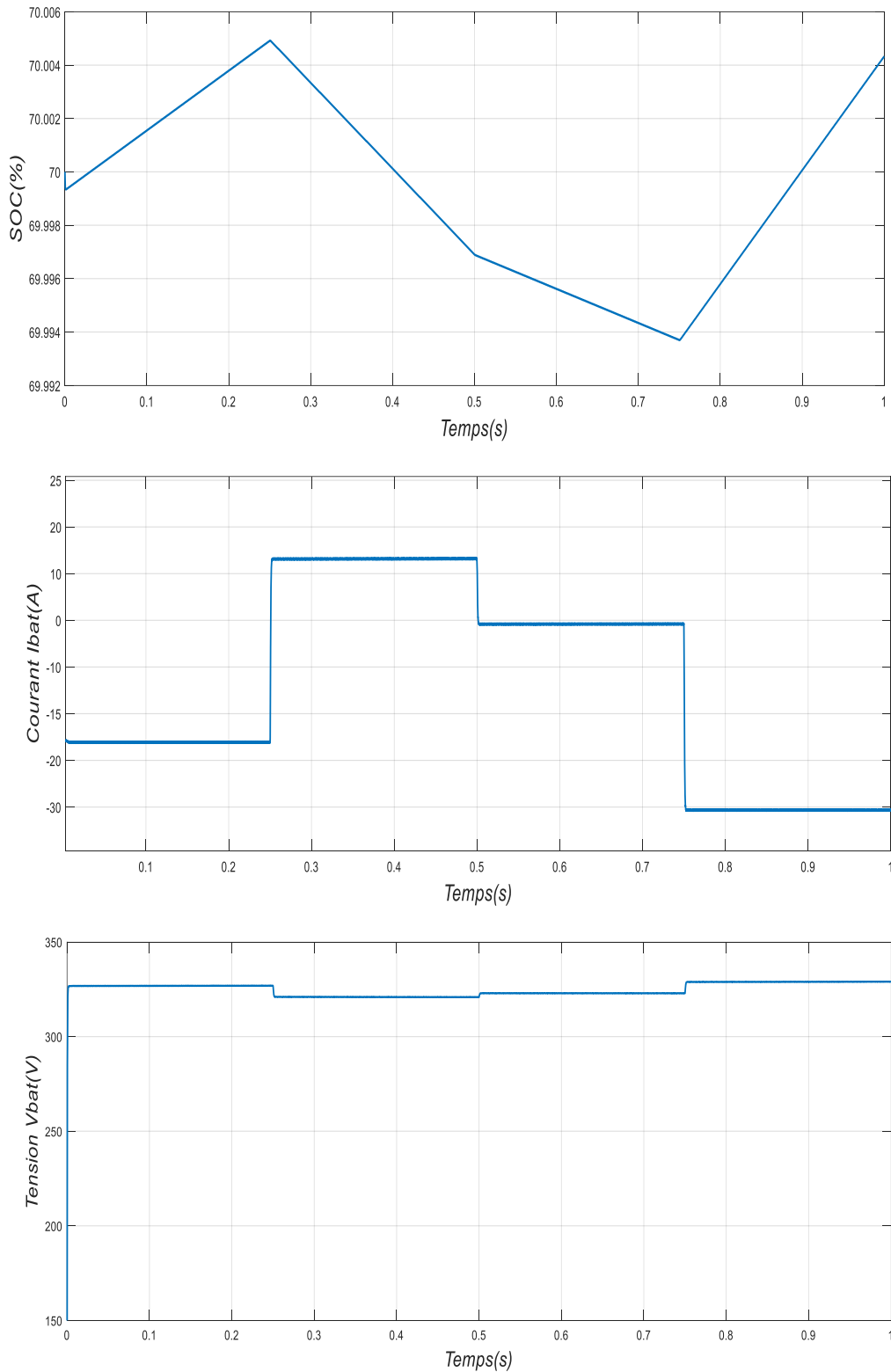


Figure 4.10 Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=300V$

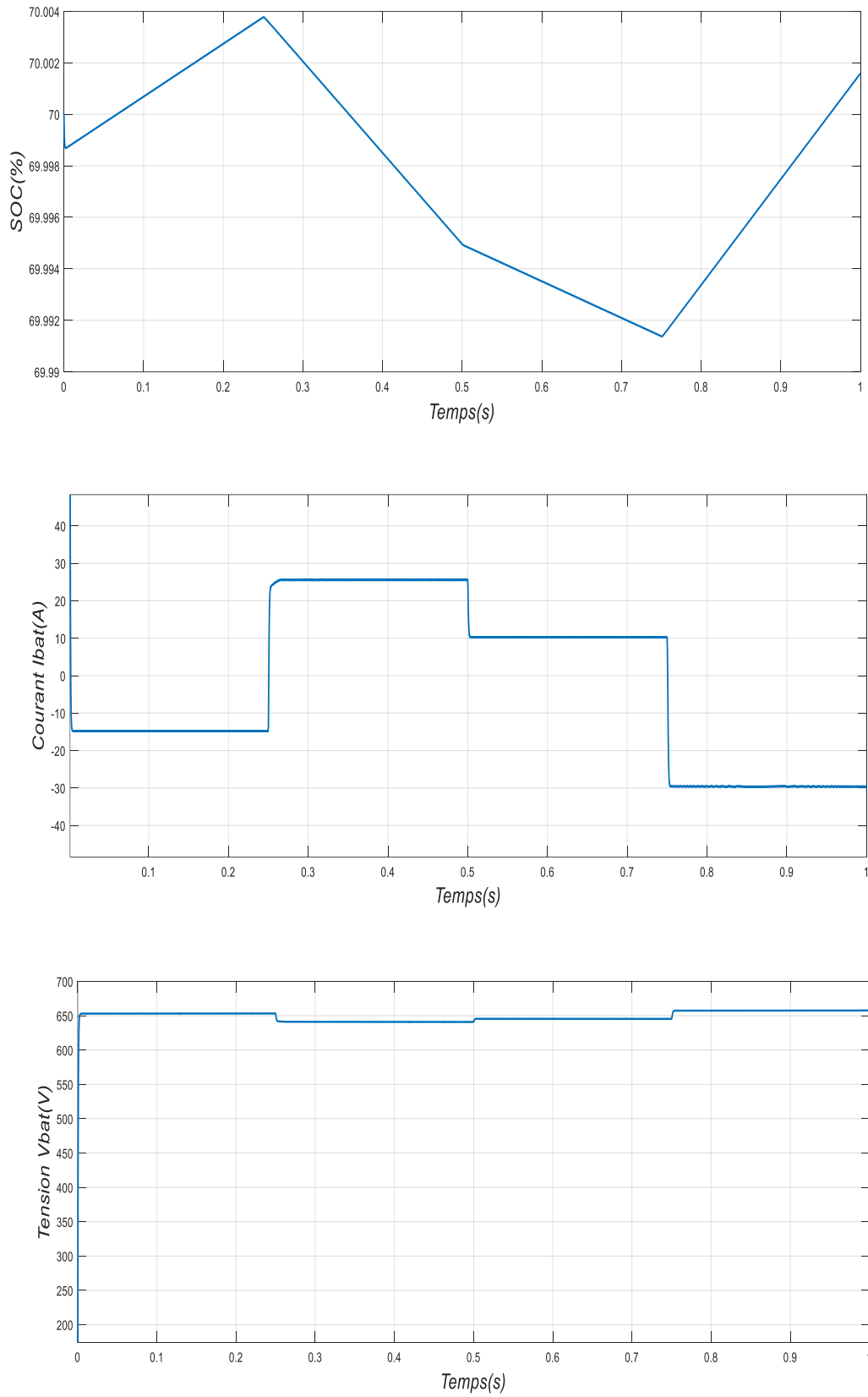


Figure 4.11 Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=600V$

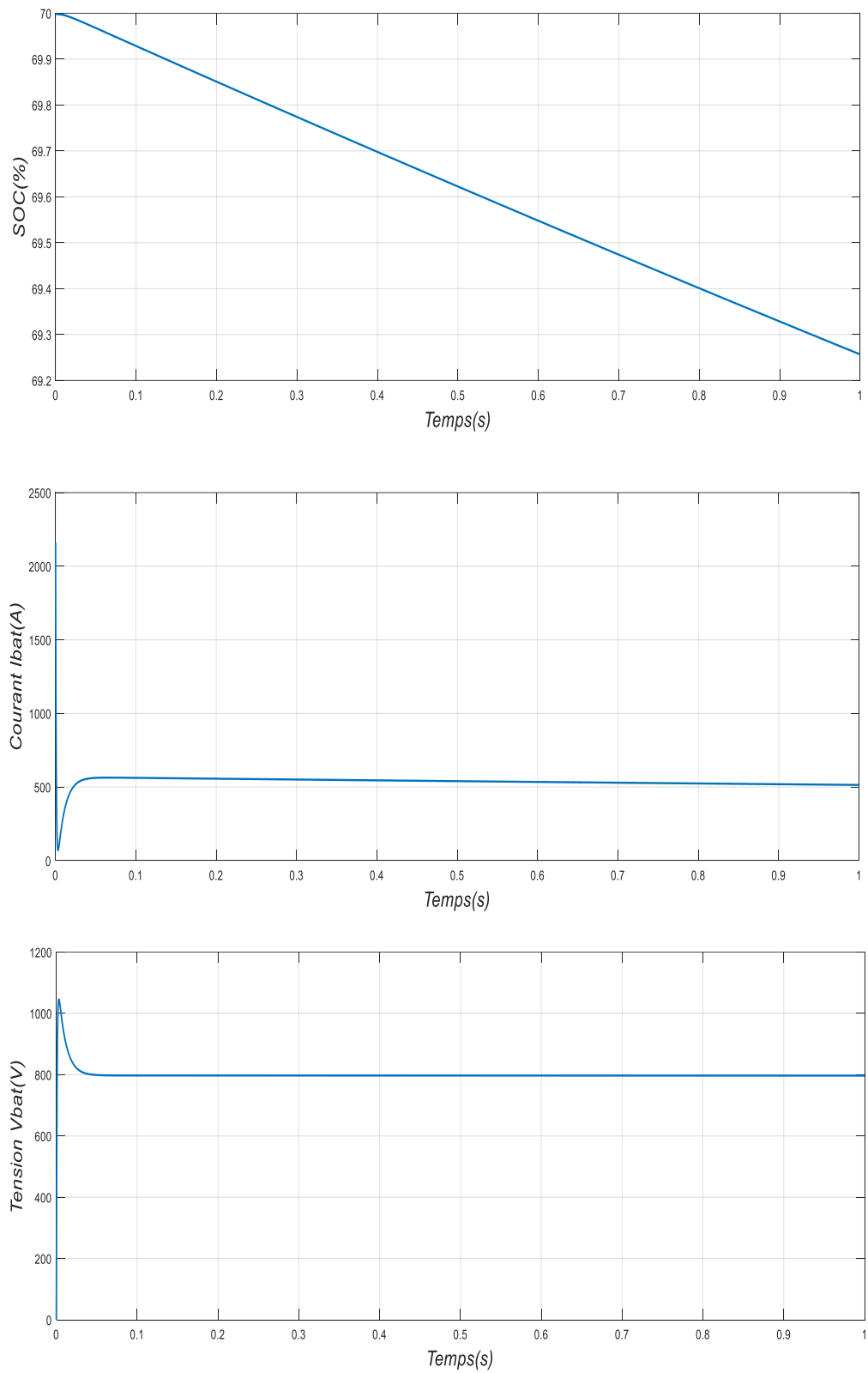


Figure 4.12 Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1000V$

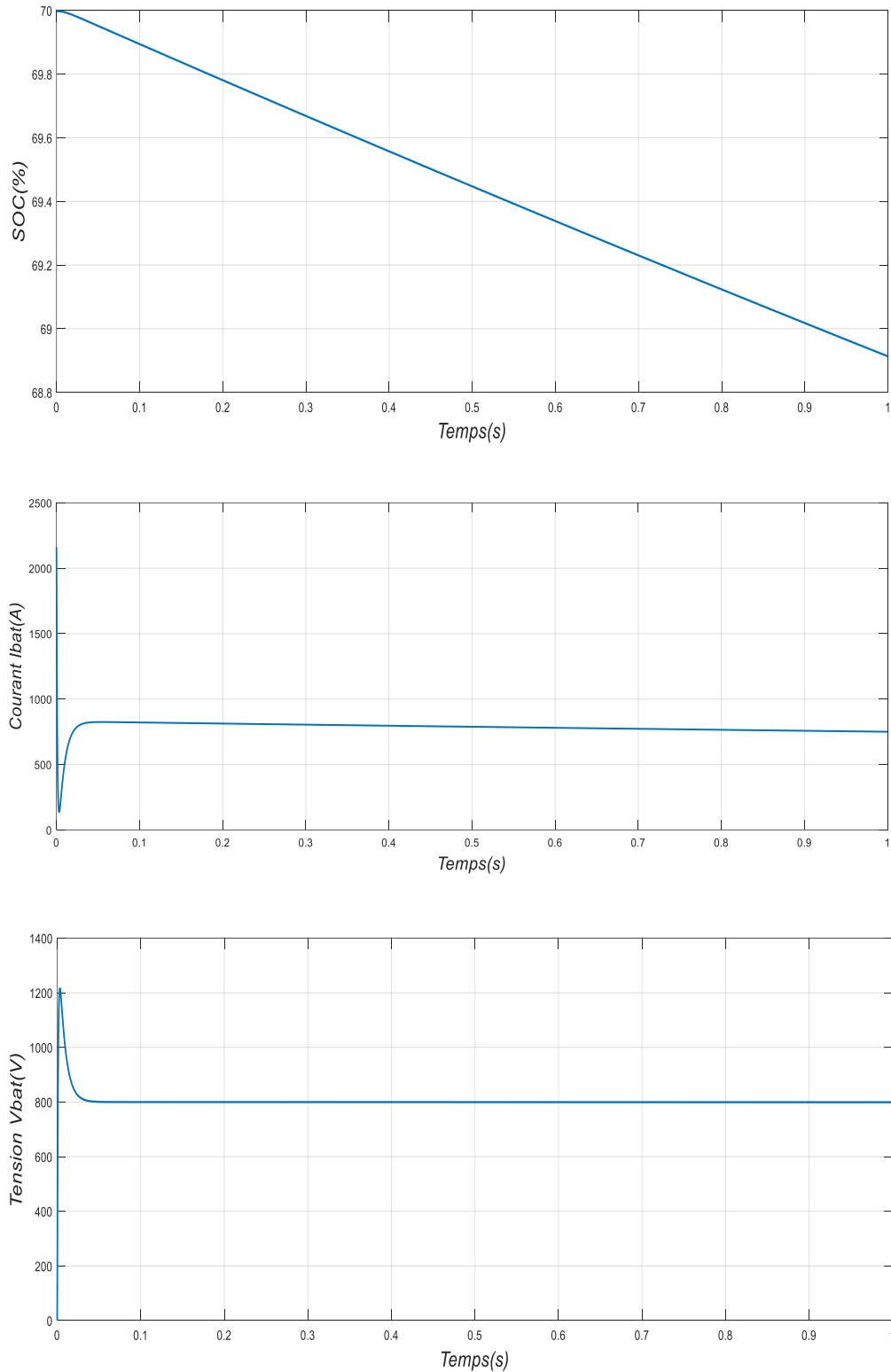


Figure4.13 Etat de charge et décharge de la batterie $V_{bat}=1200V$

L'analyse de ces figures permettent de conclure que si la tension nominale de la batterie est inférieure à celle de l'entrée du convertisseur, le système est capable tant que pour charger où décharger la batterie et contrairement, le système est incapable de charger où décharger la batterie si sa tension nominale est supérieure où égale à celle de l'entrée.

4.5 Chaîne de conversion avec batterie de stockage

La figure 4.13 montre l'insertion de l'élément de stockage (Batterie) dans la chaîne de conversion.

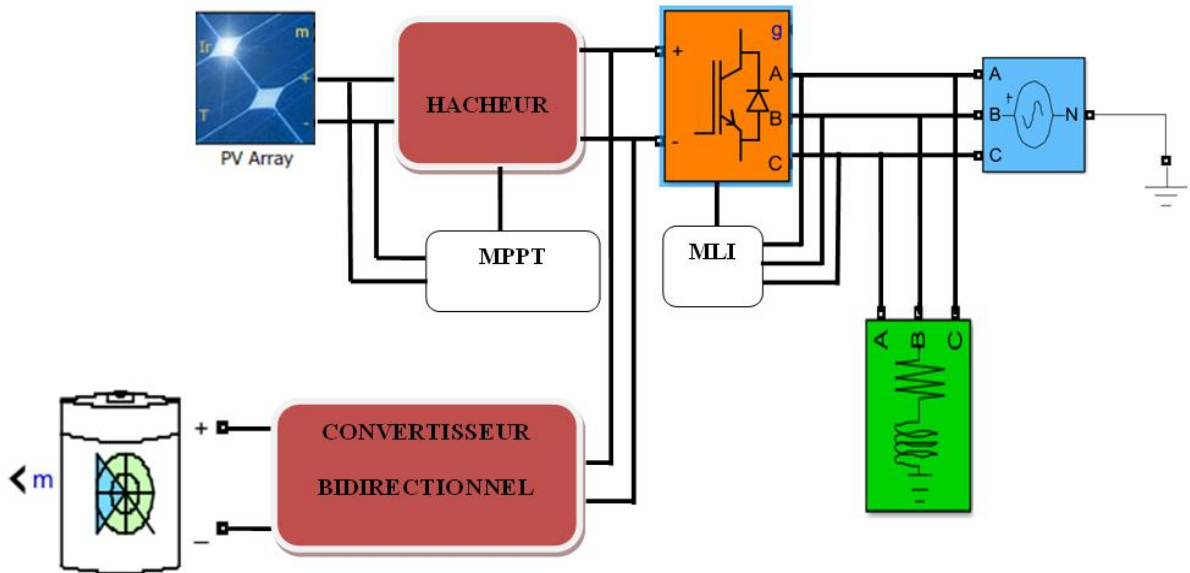


Figure 4.14 Schéma de la chaîne de conversion avec batterie de stockage

4.5.1 Simulation du fonctionnement

La chaîne dans son ensemble a été programmée dans l'environnement MATLAB Simulink.

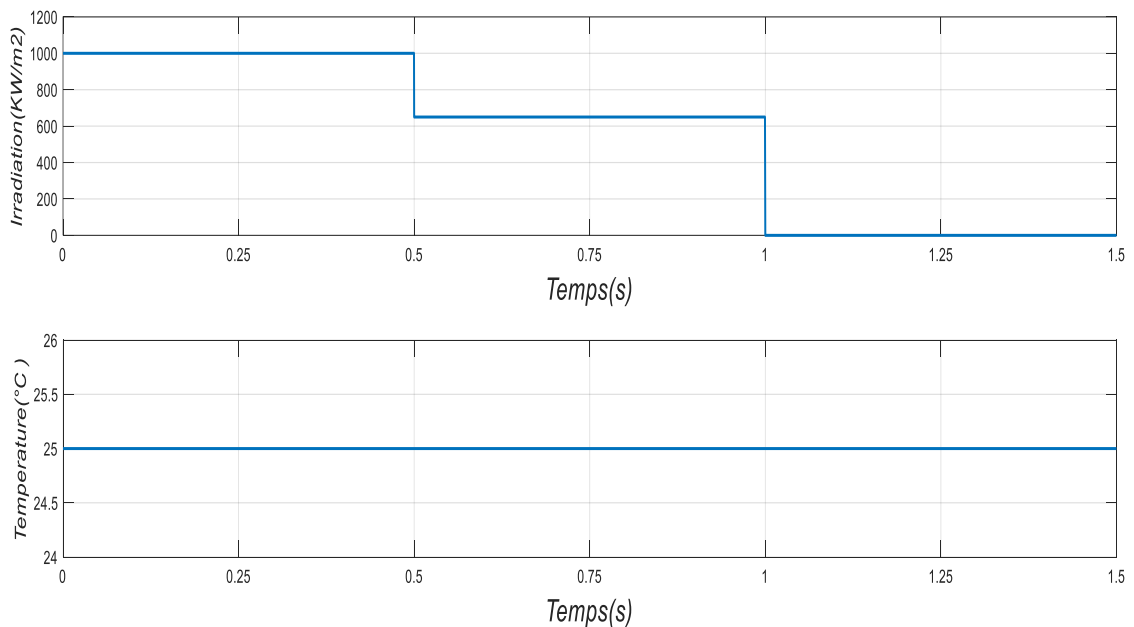


Figure 4.15 Conditions météorologiques (E variable et T constante)

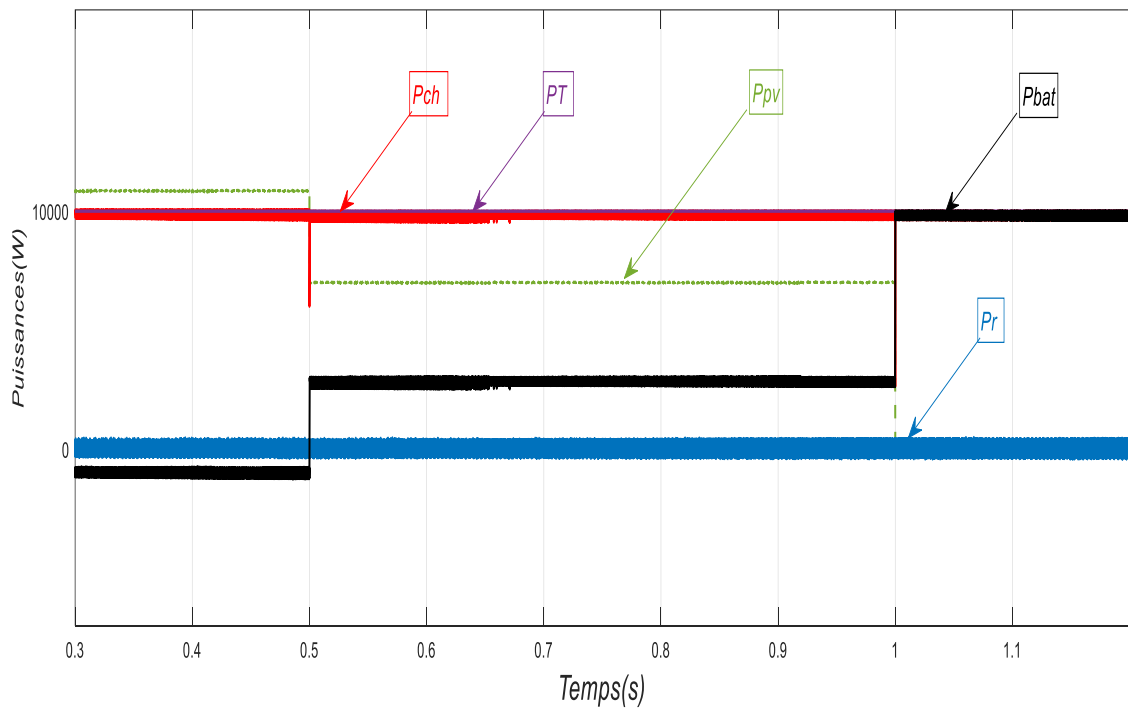
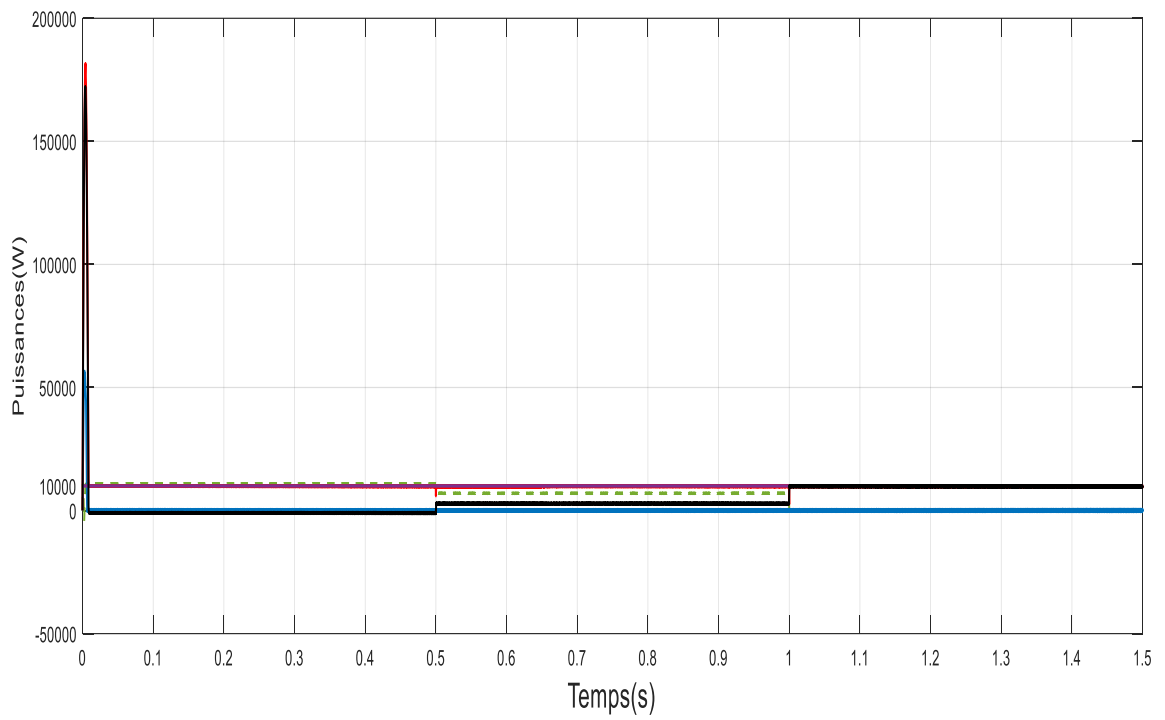


Figure4.16 Echange de puissance entre le panneau et la batterie

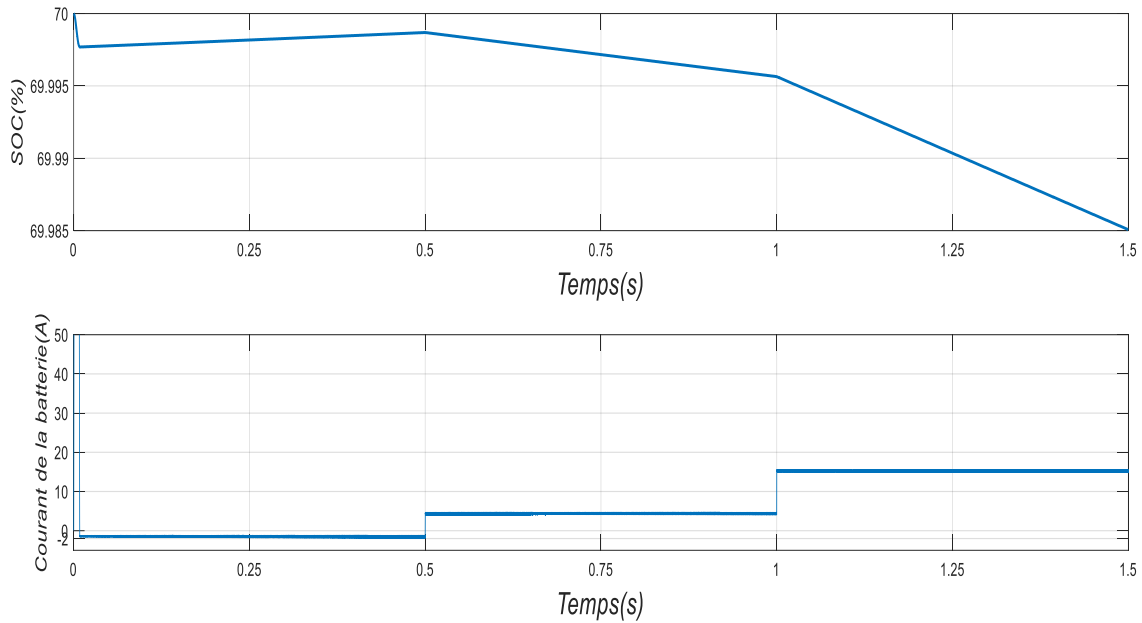


Figure 4.17 SOC et le courant de la batterie pendant la charge et décharge

Ce test de simulation est réalisé pour analyser par simulation numérique le fonctionnement de la chaîne de conversion lorsqu'on insère une batterie comme élément de stockage. Par conséquent, on a reconsidéré les mêmes profils des conditions météorologiques (voir la figure 4.14). Il est alors de noter par l'analyse de la figure 4.15 que pour l'intervalle de 0 à 0.5s l'irradiation est de $1\text{KW}/\text{m}^2$, donc le panneau produit une puissance de 11000W , ce qui couvre la puissance demandée par la charge (10KW) donc ni la puissance du réseau ni celle de la batterie ne sont utilisées pour la charge, et, dans ce cas on remarque que la batterie se charge grâce au surplus de la puissance du panneau, ce qui explique l'augmentation du SOC et la présence d'un courant négatif de la batterie. Concernant, le second intervalle de 0.5s-1s, en conséquence de la diminution de l'irradiation jusqu'à $650\text{W}/\text{m}^2$ la puissance produite par le panneau est de 7KW . Dans ce cas la batterie intervient pour se décharger et compléter le manque de la puissance demandée par la charge, ce qui explique la diminution du SOC et son courant positif. Finalement pour le dernier palier 1s-1.5s le niveau d'irradiation est à $0\text{W}/\text{m}^2$, donc la puissance produite par le panneau est nulle, ce qui impose l'échange complet de l'alimentation de la charge à partir de la batterie.

4.6 Conclusion

L'analyse du fonctionnement de la chaîne de conversion sous différentes profils de l'irradiation a été considérée. L'étude sans avoir considéré le système de stockage a montré la faisabilité de connexion de la chaîne photovoltaïque au réseau de distribution alimentant une charge alternative triphasée de puissance exigée. Cependant, l'énergie produite par le panneau en surplus à celle consommée par la charge pourrait, avantageusement, être stockée dans une batterie et être utilisée en cas de besoin quand les conditions météorologiques ne permettent plus au panneau de développer la puissance demandée par la charge.

CONCLUSION GENERALE

Les systèmes photovoltaïques sont en demande croissante à travers le monde grâce à leurs efficacité et avantages et ce notamment dans le domaine de la production et de la gestion de l'énergie électrique.

Le problème posé par l'utilisation des ressources fossiles a vu comme solution l'utilisation des énergies renouvelables qui permettent une production de l'électricité proprement tout en respectant les exigences sur la pollution. Cependant, grâce aux encouragements des décideurs pour la promotion de la technologie photovoltaïque plusieurs travaux de recherches se sont inscrits dans le domaine du développement et l'amélioration des procédés de production. Toutefois, le domaine d'applications demeure loin des attentes au vue des échéanciers fixés par les organisations internationales et demeure une des préoccupations majeurs de part le monde.

Le travail réalisé dans ce mémoire a consisté à l'étude d'une chaîne photovoltaïque raccordée à un réseau de distribution avec système une batterie de stockage. A cet effet, des notions sur les systèmes de conversion à base d'énergies renouvelables, leurs modélisations ainsi que leurs commandes ont fait partie de cette étude. Par ailleurs, la partie stockage a été amplement développée et une analyse de son application à été mise en évidence.

A l'issue de la réalisation de ce travail, on note que :

les énergies renouvelables sont en développement continu afin que leurs utilisations soient très répandues en vue de se préparer pour un avenir de production énergétique propre en remplacement des centrales à base d'énergies fossiles qui causent, de nos jours, de graves incidents particulièrement en pollution atmosphérique.

Les convertisseurs statiques, notamment les hacheurs et les onduleurs ont fait parties intégrantes des chaînes de conversion photovoltaïque. Concernant, les hacheurs leur utilisation était nécessaire pour l'amplification de la tension de sortie du système photovoltaïque et son utilisation pour le suivi de la puissance maximale produite. Par ailleurs, sous une version, ils sont utilisés pour la charge et la décharge des batteries de stockage. A leur tour, les onduleurs permettent la liaison entre la source photovoltaïque et le réseau de distribution.

En termes de stockage de l'énergie, une batterie est utilisée avec un régulateur charge/décharge et un hacheur Buck-Boost. Pour cela, un algorithme de fonctionnement tenant compte des niveaux des SOCmax et SOCmin a été développé.

Finalement, une analyse du fonctionnement de la chaîne de conversion sous différentes profils de l'irradiation a été considérée avec et sans système de stockage.

REFERENCES

- [1] S.Abouda, « contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: applications aux systèmes de pompage », Docteur en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, avril 2015.
- [2] Bendali Braham Mounir, Khelif Mahdi, «Etude et simulation d'une chaine de production photovoltaïque », Université Annaba 2018.
- [3] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/avantages-panneau-solaire-photovoltaique/> (*Mise à jour le 1 janvier 2019*).
- [4]<https://www.picbleu.fr/page/solaire-photovoltaique-questions-sur-le-cout-interet-amortissement>.
- [5] Bloomberg, L'usine de l'énergie, 64% d'électricité renouvelable dans le monde en 2050, publié le 26/06/2018.
- [6] Agence Internationale de l'Energie, « Les énergies renouvelables dans le monde », REN21 Rapport mondial 2017 sur les énergies renouvelables.
- [7] Statistical Review of World Energy, Juin 2017, <https://www.planetoscope.com/Source-d-energie/229-consommation-mondiale-d-energie-en-tep-.html>
- [8] Aspo, <http://energiepourdemain.fr/tag/gaz-de-schistes/>
- [9] Agence Ecofin, <https://www.agenceecofin.com/energies-renouvelables/2303-55522-algerie-27-de-la-production-d-electricite-sera-dorigine-renouvelable-d-ici-2030>, Date de création: 23 mars 2018.
- [10] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, « Rapport 2018 sur les énergies renouvelables du réseau d'experts REN21 : l'Algérie au TOP des pays africains », Lundi 4 juin 2018, <https://portail.cder.dz/spip.php?article6566>
- [11] M. Benhaddadi, G. Olivier, « Dilemmes Energétiques », Presses de l'université du Québec PUQ, 2008
- [1.12] Ministère de l'Énergie et des Mines, « Guide des Energies renouvelables », <http://www.memalgeria>.

- [13] H Hamidi, « Etude des méthodes d'ingénierie de bandes par les alliages semiconducteurs et leur rôle en photovoltaïque ». H HAMIDI - dspace.univ-tlemcen.dz
- [14] D Zaouk, Y Zaatari, A Khoury, C Llinares, « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », 2000 - ieeexplore.ieee.org.
- [15] https://www.google.com/search?q=Normes+de+mesures+du+spectre+d%E2%80%99%C3%A9nergie+lumineuse+%C3%A9mis+par+le+soleil,+notion+de+la+convention+AM&rlz=1C1CHBD_frDZ819DZ819&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjMs72Wn-DiAhWi2-AKHcNEA58Q_AUIECgB&biw=1366&bih=657#.
- [16] S. Pétion, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [17] Source : NREL solar spectrum, ENR : Energie Solaire, plateforme-theoreme-upmc.fr, https://www.google.com/search?q=Spectres+Solaires+relev%C3%A9s+dans+plusieurs+conditions+selon+la+convention+AM&rlz=1C1CHBD_frDZ819DZ819&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjT8ci5oODiAhWOkxQKHXytCBcQ_AUIESgC&cshid=1560215727139726&biw=1366&bih=657#
- [18] S. Astier, « Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule », Techniques de l'ingénieur D3935, 2008.
- [19] Cabal C. « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.» Thèse de doctorat 2008.
- [20] Faranda R., Leva S. "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems." Wseas Transactions on Power Systems, Issue 6, Volume 3, Juin 2008.
- [21] Cid Pastor A. « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques.» Thèse de doctorat, Université de Toulouse 2006.
- [22] Helali K. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ». Mémoire de Majjistaire, 2012. Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [23] Fiche technique 22 mars 2008 (suite) Cellule Solaire : Modèle Spice I.U.T. de Nîmes giamarchi@iut-nimes.fr.us
- [24] Bernard FONTAINE, « La production photovoltaïque d'électricité : quelles perspectives pour le Pays Provence Verte? », Directeur de Recherche au CNRS Conseiller Municipal de Garéoult Secrétaire Général du Conseil de Développement du Pays Provence Verte Bernard.fontaine@lp3.univ-mrs.fr, Juillet 2009
- [25] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

- [26] Jean-Yves, « ALIMENTATION A DECOUPAGE : Etude, choix et dimensionnement des alimentations à découpage usuelles », LE CHENADEC Lycée Louis ARMAND
jy.lechenadec@libertysurf.fr
- [27] Mimou Azzoug, « Dimensionnement et conception des hacheurs Buck-Boost & çuk »
- [28] Ouabdelkader Katia, Mersel Houria, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Bejaia 2015.
- [29] F.Salama « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [30] A. Oi, « Design and simulation of photovoltaïque water pumping system ». Partial Fulfillement of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Louis Obispo Septembre 2005.
- [31] Touzani Youcef, «Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdale du courant », thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2010
- [32] G.Haizea, « Etude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisés : application au micro réseaux ». Thèse de doctorat dans le cadre de l'école doctorale de Grenoble, 15 Décembre 2006.
- [33] A. Lakhdara, M. Taguig, « Etude des performance d'un moteur asynchrone associé a un onduleur multiniveau », Université de Annaba 2008.
- [34] R. Merahi, « Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010.
- [35] E. Gholipour Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.
- [36] J. XU, « Filtrage actif shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.
- [37] Vincent Benamara, « Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage », École de technologie supérieure université du Québec, Montréal 2012